

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

**Schvalovací proces pecního zařízení pro precipitační  
vytvrzování a žihání materiálů pro letecký průmysl**

The Approval Process of Furnace Equipment for Precipitation Hardening  
and Annealing of Materials for Aerospace Industry

Student:

Bc. František Vašíček

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Petr Mohyla, Ph.D.

Ostrava 2015

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra mechanické technologie

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. František Vašíček**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie

Specializace: 10 Technologický management

Téma: Schvalovací proces pecního zařízení pro precipitační vytvrzování a žíhání materiálů pro letecký průmysl  
Approval Process of Furnace Equipment for Precipitation Hardening and Annealing of Materials for Aerospace Industry

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte studii korozivzdorných martenzitických materiálů pro letecký průmysl
2. Zpracujte studii tepelného zpracování se zaměřením na precipitační vytvrzování ocelí včetně výběru vhodného zařízení
3. Proveďte proces testování vybraného zařízení dle norem AMS 2750/E a AMS 2759/3E
4. Proveďte ověření vlastností daných materiálů s použitím vzorků
5. Proveďte ověření vlastností finálních výrobků
6. Vyhodnoťte dosažené výsledky vzhledem ke schvalovacímu procesu pecního zařízení

Seznam doporučené odborné literatury:

MOHYLA, M. *Strojírenské materiály*. Skripta VŠB – TU Ostrava, 2. vydání, 2003, 146 s.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Petr Mohyla, Ph.D.**

Datum zadání: 12.12.2014

Datum odevzdání: 18.05.2015



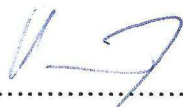
  
doc. Ing. Petr Mohyla, Ph.D.  
vedoucí katedry

  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.


V Ostravě 15. května 2015

  
.....  
podpis studenta

## Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do její skutečné výše).
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 15. května 2015

  
.....  
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. František Vašíček

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Zarybník 527, 594 42 Měřín

**ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE**

VAŠÍČEK, F. *Schvalovací proces pecního zařízení pro precipitační vytvrzování a žihání materiálů pro letecký průmysl: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2015, 83 s. Vedoucí práce: Mohyla, P.

Diplomová práce se zabývá realizací schvalovacího procesu vybraného pecního zařízení pro precipitační vytvrzování a žihání materiálů určených pro výrobu leteckých komponentů. Teoretická část je věnována popisu, rozdělení a značení korozivzdorných materiálů, jejich tepelnému zpracování a podmínkám pro výběr vhodného pecního zařízení pro leteckou výrobu. Praktická část je zaměřena na ověřování provozních podmínek pecního zařízení, vzorkování precipitačního vytvrzování a žihání vybraných materiálů. Celý schvalovací proces je ukončen testováním ověřovací série produkčních dílců a udělením zákaznického certifikátu.

**ANNOTATION OF THE DIPLOMA THESIS**

Vašíček, F. *The Approval Process of Furnace Equipment for Precipitation Hardening and Annealing of Materials for Aerospace Industry: Diploma Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machine Parts and Mechanisms, 2015, 83 p. Thesis head: Mohyla, P.

The diploma thesis deals with the authorization process realization of a furnace facility chosen for the precipitation hardening and annealing of materials suitable for the aerial component production. The theoretical part is focused on the description, division and corrosion-resistant material marking, the heat treatment of these materials and the conditions of the choice of the furnace facility suitable for the aerial production. The practical part deals with the operational condition authentication of the furnace facility, the precipitation hardening sampling and the annealing of the chosen materials. The authorization process is concluded with the testing of the authentication of the production segment series as well as with the customer certificate granting.

## Obsah

<b>Seznam použitých značek a symbolů</b>	8
<b>ÚVOD</b>	9
<b>1 TEORETICKÝ POPIS KOROZIVZDORNÝCH MATERIÁLŮ</b>	10
1.1 Rozdělení korozivzdorných ocelí	12
1.1.1 Austenitické oceli	12
1.1.2 Feritické oceli	13
1.1.3 Martenzitické oceli	15
1.1.4 Dvoufázové korozivzdorné oceli (duplexní oceli)	17
1.1.5 Precipitačně vytvrditelné korozivzdorné oceli	18
1.2 Značení korozivzdorných ocelí	18
1.2.1 Evropské značení	19
1.2.2 Americké značení	20
<b>2 MARTENZITICKÉ KOROZIVZDORNÉ OCELI</b>	23
2.1 Vysokopevnostní ocel - maraging	25
2.1.1 Tepelné zpracování	26
2.2 Precipitačně vytvrditelné oceli	27
2.3 Středně uhlíkové nízkolegované oceli	29
<b>3 PRECIPITAČNÍ VYTVRZOVÁNÍ</b>	31
3.1 Tepelné zpracování	34
3.1.1 Rozpouštěcí žhání	35
3.1.2 Ochlazování	36
3.1.3 Precipitační proces	37
3.2 Pecní zařízení	40
<b>4 VÝBĚR PECNÍHO ZAŘÍZENÍ</b>	41
4.1 Vybrané zařízení	42
<b>5 OVĚŘOVÁNÍ SCHOPNOSTI PECE</b>	44
5.1 Test homogenity teplotního pole (TUS)	45
5.1.1 Testování TUS	46
5.2 Zkouška systémové přesnosti (SAT)	48
5.2.1 Testování SAT	50
5.3 Test řídicího regulátoru	53
5.3.1 Testování regulátoru	53
5.4 Ověřování těsnosti pece	55
5.4.1 Leak Rate Test (LRT)	56
5.5 Shrnutí schopností pece	58
<b>6 OVĚŘOVÁNÍ PROCESU</b>	59
6.1 Požadavky na testování vzorků	59
6.2 Tepelné zpracování vzorků	61
6.3 Vyhodnocení vzorků	63

6.3.1	Vzorky mat. 15-5PH	64
6.3.2	Vzorky mat. PH13-8Mo	66
6.3.3	Titanová slitina 10V-2Fe-3Al	68
<b>7</b>	<b>OVĚŘOVACÍ SÉRIE</b>	69
7.1	Precipitační vytvrzování	69
7.2	Žíhání	72
<b>8</b>	<b>SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ SCHVALOVACÍHO PROCESU</b>	74
<b>9</b>	<b>ZÁVĚR</b>	77
	<b>Použité zdroje</b>	79
	<b>Seznam příloh</b>	82



**Seznam použitých značek a symbolů**

AISI	-	American Iron and Steel Institute
AMS	-	Aerospace Material Specification
ASTM	-	American Society for Testing and Materials
ČSN	-	Česká soustava norem
EN	-	Evropská norma
IGO	-	Inter crystalline oxidation
LRT	-	Leak Rate Test
$M_f$	-	martenzit finish
$M_s$	-	martenzit start
Nadcap	-	the National Aerospace and Defense Contractors Accreditation Program
PRE	-	Pitting Resistan Equivalent
PH	-	Precipitation Hardening
SAE	-	Society of Automotive Engineers
SAT	-	System Accuracy Test
TUS	-	Temperature Uniformity Survey
UNS	-	the Unified numbering system
UZ	-	ultrazvuk
bcc	-	Body-centered cubic
fcc	-	Face-centered cubic
$u_C$	-	kombinovaná standardní nejistota



## ÚVOD

Tato diplomová práce je zaměřena na průběh schvalovacího procesu pro vybraný typ pecního zařízení určeného především k precipitačnímu vytvrzování leteckých materiálů a žíhání vybrané titanové slitiny.

Ověřování vhodnosti zvoleného zařízení se provádělo podle leteckých standardů pro zařízení určená k precipitačnímu vytvrzování a žíhání. Vlastnosti pece byly posuzovány podle dosažených výsledků homogenity teplotního pole, systémové přesnosti zařízení a těsnosti topné komory.

Dosahování mechanických vlastností podle materiálových standardů bylo testováno na vzorcích vybraných materiálů a posléze na ověřovací sérii produkčních dílců.

Celý zkušební proces se dokládal záznamy tepelného zpracování z ověřovaného zařízení, získané vlastnosti materiálů po precipitačním vytvrzení byly porovnávány se standardy SAE AMS norem v externí laboratoři, která splňuje podmínky Nadcap pro letecký průmysl.

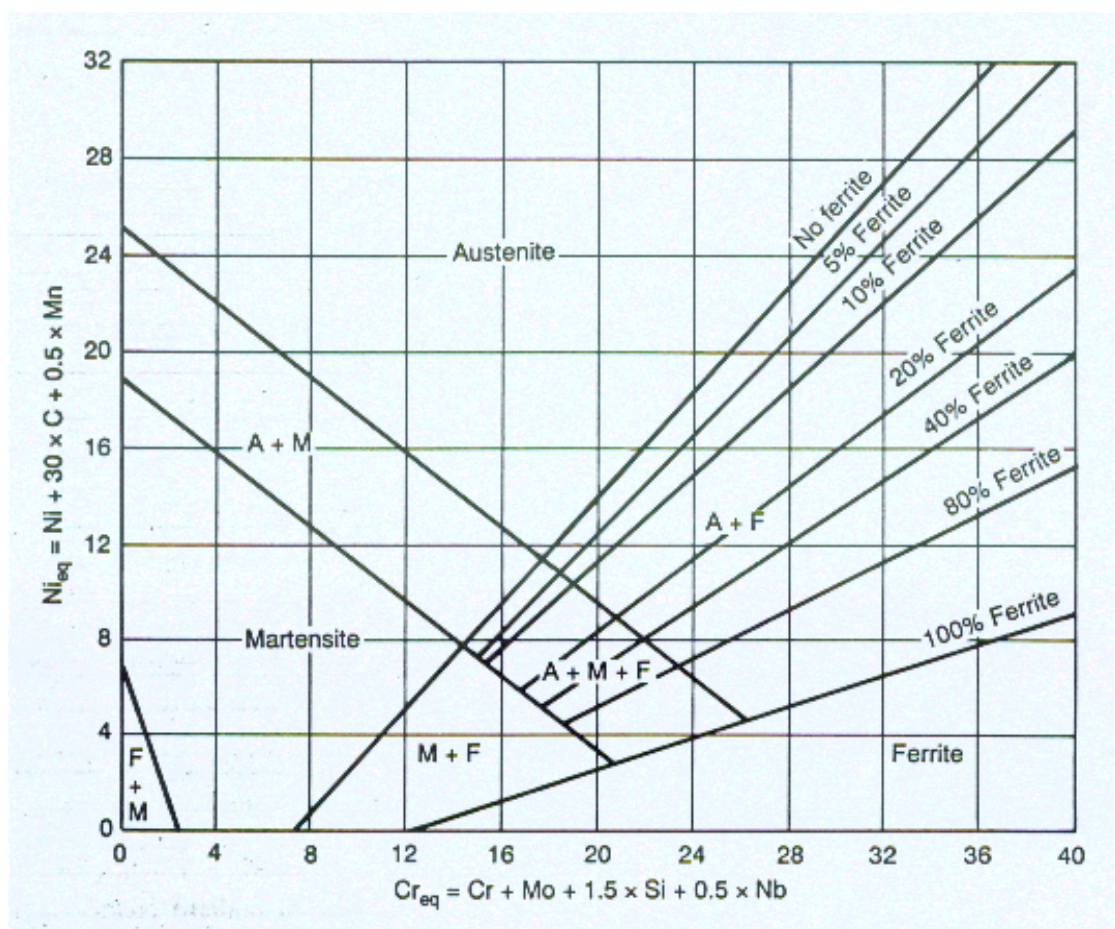
Po ukončení schvalovacího procesu byla pec BMI B55R certifikována na určené tepelné zpracování dílců pro zákaznické firmy působící v leteckém průmyslu.

## 1 TEORETICKÝ POPIS KOROZIVZDORNÝCH MATERIÁLŮ

Korozivzdorné oceli se řadí mezi konstrukční legované materiály, které jsou charakteristické svým chemickým složením a zvýšenou odolností proti korozi za normální i zvýšené teploty.

Základním prvkem ve vysokolegovaných korozivzdorných ocelích je chrom. Jeho obsah je zpravidla vyšší než 11,5 % (až 30 %). Další důležité legující prvky jsou nikl – až 30 % a mangan – až 24 %. Obsah uhlíku je v rozmezí 0,01–0,1 %, u martenzitických ocelí 0,2–1,0 %. Síra a fosfor jsou charakteristické nízkými obsahy, zpravidla do 0,03 % [1].

Pro odhad struktury chrom-niklových ocelí slouží Schaefflerův a DeLongův diagram (viz obr. 1). Tento diagram znázorňuje vlivy feritotvorných prvků (největší vliv má chrom) uzavírajících oblast  $\gamma$  a austenitotvorných prvků (největší vliv má nikl) rozšiřujících oblast  $\gamma$  na výslednou matici.



**Obr. 1** Schaefflerův diagram [4].

Pro feritotvorné prvky uzavírající oblast austenitu se zavádí pojem chrom–ekvivalent  $Cr_{ek}$  a pro austenitotvorné prvky rozšiřující oblast austenitu se zavádí pojem nikl–ekvivalent  $Ni_{ek}$ . Jejich hodnota je dána rovnicemi [4]:

$$Cr_{ek} = Cr + Mo + 1,5 Si + 0,5 Ni + 5 V + 3 Al \quad (1.1)$$

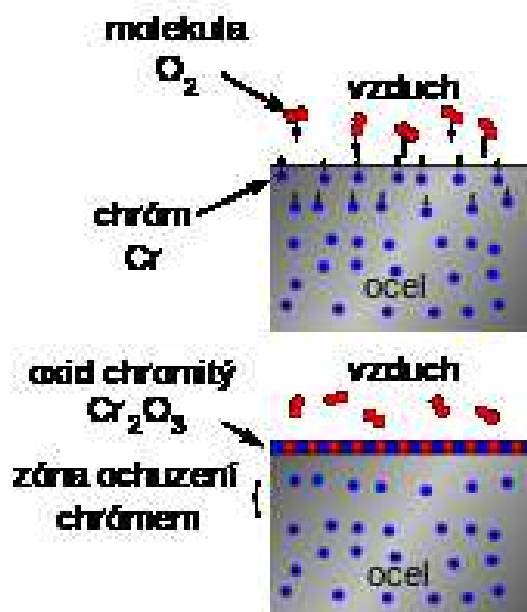
$$Ni_{ek} = Ni + 30 C + 0,74 Mn + 0,33 Cu + A (N - 0,045) \quad (1.2)$$

kde: A – konstanta závisící na obsahu dusíku:  $N < 0,2 \%$  je  $A = 30$ ,

$N = 0,21$  až  $0,25 \%$  je  $A = 22$ ,

$N = 0,26$  až  $0,35 \%$  je  $A = 20$

Odolnost proti elektrochemické korozi v oxidačním prostředí je dána schopností korozivzdorných ocelí vytvářet za určitých podmínek ochrannou pasivační vrstvu. Podmínkou je přítomnost minimálně 11,7 % Cr v tuhém roztoku a nízký obsah uhlíku ( $C < 0,08 \%$ ), který s chromem tvoří karbidy.



**Obr. 2** Mechanismus pasivace korozivzdorných ocelí [5].

Tvorbou karbidů snižuje uhlík obsah chromu v tuhém roztoku a takto ochuzená místa o chrom mají sníženou korozivzdornost (viz obr. 2). Precipitace karbidů chromu  $M_{23}C_6$  na hranicích zrn může být zdrojem mezikrystalová koroze. Tvorbu pasivační vrstvy podporuje Ni (obtížně se okysličuje), který rovněž zvyšuje odolnost proti redukčním kyselinám a molybden zvyšující odolnost proti bodové korozi [3,4].

## 1.1 Rozdělení korozivzdorných ocelí

Z hlediska **užitných vlastností** rozděluje norma ČSN EN 10088 korozivzdorné oceli na:

- oceli odolné korozi – dobrá odolnost vůči působení prostředí,
- žáruvzdorné oceli – dobrá odolnost proti oxidaci a účinkům teplot  $> 550\text{ °C}$ ,
- žárovevné oceli – dobrá odolnost proti deformacím při dlouhodobém mechanickém namáhání a teplotách nad  $500\text{ °C}$ .

Podle **mikrostruktury** rozděluje norma ČSN EN 10088 korozivzdorné oceli na:

- austenitické,
- feritické,
- martenzitické,
- precipitačně vytvrditelné,
- duplexní (dvoufázové).

### 1.1.1 Austenitické oceli

Austenitické korozivzdorné oceli patří mezi nejznámější a nejpoužívanější oceli. Nejčastější obsahují 18 až 20 % Cr a 8 až 11 % Ni. Rozpustnost uhlíku v austenitu je 0,03 %. Limitován je obsah fosforu (max. 0,025 až 0,045 %), obsah síry (max. 0,010 až 0,015 %), obsah křemíku (max. 0,70 až 2,00 %) a také obsah manganu (max. 1,00 až 2,00 %). Při vyšším obsahu uhlíku je nutné provést u austenitických ocelí rozpouštěcí žihání. Probíhá v rozmezí teplot  $1\,000\text{ °C}$  až  $1\,200\text{ °C}$  a je nutné rychlé ochlazení (nejlépe do vody) [4, 13].

Strukturu tvoří převážně austenit ( $\gamma\text{-Fe}$ ), který má krychlovou plošně centrovanou mřížku (*fcc - face-centered cubic*), je tvrdý a houževnatý. Austenitická matrice je zajišťována dostatkem austenitotvorných prvků (nikl, mangan, uhlík, dusík). Oceli jsou nemagnetické, ale zbytkový obsah 3–10 % delta feritu může způsobovat slabý feromagnetismus [2].

Z metalurgického hlediska mají austenitické oceli řadu výhod. Mají nízkou mez kluzu 200–300 MPa, vysokou houževnatost v širokém rozmezí teplot ( $240 \text{ J cm}^{-2}$  při teplotě  $-196 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ), při tváření za studena mohou dosahovat vysokých hodnot pevnosti (až 2 000 MPa). Oproti feritickým ocelím se nesnižuje mez pevnosti při vyšších teplotách.

Nevýhodou je nižší mez únavy (cca 30 % meze pevnosti) ve srovnání s feritickými ocelmi (~50 až 60 %). Austenitické oceli nelze vytvrzovat. Při pomalém ochlazování, např. po svařování, dochází v oblasti kritických teplot přibližně v rozmezí teplot  $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$  k vylučování karbidů po hranici zrn. Vzniká mezikrystalová koroze v oblastech ochuzených o chrom. Aby se zabránilo vylučování karbidů při svařování, legují se tyto oceli Ti, nebo Nb, které s C tvoří stabilnější karbidy TiC a NbC. Stopy feritu a vysoké obsahy chromu a molybdenu mohou podporovat vylučování sigma fáze ( $\sigma$ ), která je křehká [6,7].

Austenitické oceli dobře odolávají korozi běžného prostředí za přispění Cr, Mo, Ni, Si. Mezikrystalická koroze lze zabránit stabilizací Ti, nebo Nb a bodové korozi legováním Mo, Si, N. Většímu rozšíření brání poměrně vysoké ceny Ni [7].

### 1.1.2 Feritické oceli

Obsahují 11,5–30 % Cr a obsah uhlíku je zpravidla do 0,08 %. Rozpustnost uhlíku v chromovém feritu je menší než 0,01%, při vyšších koncentracích je vyloučen ve formě karbidů  $\text{M}_{23}\text{C}_6$ , chrom rovněž tvoří i nitridy  $\text{Cr}_2\text{N}$ . Vyloučené karbidy způsobují křehnutí ocelí [7, 13].

Struktura feritických ocelí je tvořena feritem (železo  $\alpha$ ), který má krychlovou prostorově centrovanou mřížku (*bcc - body-centered cubic*). Při ohřevu se karbidy rozpouštějí ve feritu, ale struktura se na austenitickou nemění. Nedoporučuje se použití při teplotách nad  $320 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Při teplotním působení od cca 350 do  $550 \text{ }^{\circ}\text{C}$  se snižuje houževnatost a tažnost a materiál křehne. Toto křehnutí nabývá maxima při teplotě  $475 \text{ }^{\circ}\text{C}$  – tzv. křehnutí „ $475 \text{ }^{\circ}\text{C}$ “ [4, 13].

Podle chemického složení lze feritické oceli rozdělit na [7]:

- oceli s obsahem chromu 11,5–13,0 %, uhlíkem do 0,08 % a s legujícími feritotvornými prvky Al, Ti, Nb.

- oceli s obsahem chromu 16–18 %, uhlíkem do 0,1 %, se stabilizací titanem nebo niobem a legované molybdenem,
- oceli s obsahem chromu 20–30 %, uhlíkem 0,002–0,2 %.

#### Oceli s obsahem do 13 % Cr

Oceli této skupiny se vyznačují dobrou korozní odolností v méně agresivním prostředí (atmosféra, voda, vodní pára a slabé organické kyseliny). Mají velmi nízký obsah uhlíku (cca do 0,05 hm. %). Používají se např. na výfukové systémy, jako spotřební zboží - grily, kování, armatury atd., na zařízení v chemickém průmyslu - sedla ventilů, potrubí čerpadel, nádrže, kolony [3].

#### Oceli s obsahem 18 % Cr

Tyto oceli s obsahem Cr 16–18 % a velmi nízkým obsahem uhlíku (maximálně do 0,03 %) mají velmi dobré plastické vlastnosti. Přísada Mo snižuje rychlost koroze v aktivním stavu, zvyšuje tvrdost feritu a odolnost vůči bodové i celkové korozi tvorbou stabilnější pasivační vrstvy. Oproti austenitickým ocelím mají o 50 % vyšší mez kluzu (300–400 MPa), nejsou citlivé na korozi pod napětím v roztocích chloridů, malé zpevnění za studena, neobsahují drahý Ni – jsou levnější [3].

Nevýhodou je obtížnější svařitelnost, kdy při tepelném zpracování a svařování hrubne zrna (nižší houževnatost). Nezabráníme-li vylučování karbidů  $M_{23}C_6$  a nitridů  $Cr_2N$  stabilizací (Ti, Nb), mají sklon k tvorbě mezikrystalové koroze [3].

Mechanické vlastnosti závisí na chemickém složení, tepelném zpracování a velikosti zrna. Mez kluzu lze zvýšit precipitačním vytvrzováním nebo tvářením za studena. Zvyšováním teploty mez kluzu a pevnost plynule klesají. Při ohřevu a ochlazování nenastávají objemové změny – lze použít jako oceli žáruvzdorné [3].

Precipitaci karbidů a nitridů chromu se zabraňuje stabilizací ocelí niobem, či titanem. Tyto přísady zabraňují ochuzení hranic zrn o chrom, a tím i vzniku mezikrystalové koroze (váží na sebe uhlík z důvodu vyšší afinity, a tím brání tvorbě karbidů a nitridů Cr). Vyšší obsahy těchto prvků však nepříznivě ovlivňují mechanické vlastnosti - snižují tranzitní teploty [3].

Používají se v potravinářském průmyslu pro zpracování mléka, výrobě piva, octa apod. Dále při výrobě kuchyňských potřeb a sanitárních zařízení, v automobilovém



průmyslu a v architektuře. V případě legování Mo odolávají většímu množství chloridů a v mnoha případech nahrazují slitiny Ni (např. Cu-Ni) [1,3].

#### Oceli s obsahem 22–30 % Cr

Oceli s velmi nízkým obsahem intersticiálních prvků C a N (pod 0,010 %), obsahem Cr 25 až 29 % a molybdenem až do 4 %. Základní matricí je ferit, ve kterém je rozpuštěn veškerý chrom. Nazývají se „*superferry*“ a bývají stabilizovány Ti nebo Nb. Mají sníženou přechodovou teplotu až do -40 °C, zvýšenou odolnost proti rovnoměrné a mezikrystalové korozi a koroznímu praskání [3].

S hlediska mechanických vlastností mají vyšší pevnostní hodnoty, dobrou tažnost a vrubovou houževnatost. Jsou dobře svařitelné a tvařitelné. Nelze je zušlechťovat. Zvýšení pevnosti lze dosáhnout tvářením, stejně jako zjemnění zrna [1,3].

Hlavní využití superferytů je hlavně tam, kde nelze využít běžné korozivzdorné oceli. Prostředí oxidačních a organických kyselin, vody o vysokém obsahu chloridů, mořská voda. Jsou levnější než austenické oceli, proto je často nahrazují [1].

### **1.1.3 Martenzitické oceli**

Jde o oceli obsahující do 17–19 % Cr a s obsahem C do 1,2 %. Minimální obsah uhlíku je omezen 0,08 %. Pokud je obsah C nižší než minimální obsah, je kompenzován Cu. Obsah feritu by neměl překročit 20 %. Po zakalení vykazují martenzitickou strukturu [4].

Martenzitické oceli dosahují nejvyšší korozní odolnosti u kvalitního, nejlépe leštěného povrchu. V zakaleném stavu mají dobrou korozní odolnost. Následným popouštěním v rozsahu teplot 450 až 550 °C dochází k vylučování karbidů z martenzitu, což vede ke snížení korozní odolnosti. Nevýhodou při použití martenzitických ocelí je křehkost. Projevuje se po popouštění v rozmezí teplot 350 až 550 °C, a to zejména u ocelí s obsahem uhlíku nad 0,2 % . Dalším možným nebezpečím je vodíková křehkost, vznikající po tepelném zpracování v ochranných atmosférách, nebo po následném moření [1,4].



### Martenzitické oceli bez niklu

Oceli s rostoucím obsahem uhlíku až po obsah 0,95–1,20 % a obsahem Cr až do 17–19 %. U ocelí s vyšším obsahem uhlíku a chromu se dolegovávají molybdenem, wolframem a vanadem – zlepšuje se odolnost proti rovnoměrné a důlkové korozi. Oceli nad 0,2 % C jsou obtížně svařitelné [4].

Oceli s obsahem uhlíku 0,2 % se využívají v chemickém a energetickém průmyslu. Vyrábí se z nich lopatky parních turbín, součásti čerpadel, armatury pro chemické prostředí apod. Na výrobu nožů v potravinářském průmyslu a v chirurgii, a také na otěruvzdorné součásti pracující v agresivním prostředí se využívají především oceli se zvýšeným obsahem uhlíku 0,5 až 0,6 % a obsahem Cr 15 %. Pro výrobu konstrukčních dílů s vysokými nároky na otěruvzdornost a vysokou korozní odolnost se využívá ocel se 17 % Cr a cca 1 % C [1].

### Martenzitické oceli s niklem

Struktura ocelí je tvořena nízkouhlíkovým martenzitem a sekundárním austenitem, který vzniká při popouštění. Pro rozšíření  $\gamma$  oblasti a potlačení  $\delta$  feritu se přidává nikl. Tato struktura zaručuje vysokou houževnatost až do nízkých teplot, vyšší pevnost a zlepšené plastické vlastnosti oproti martenzitickým ocelím bez Ni. Vzhledem k nízkému obsahu uhlíku jsou oceli dobře svařitelné [4].

Využití těchto ocelí je především při výrobě strojů a zařízení přicházející do styku s vodou, párou a zejména mořskou vodou (legované do 3 % Mo) [1].

### Supermartenzitické oceli

Nový vývojový trend v oblasti martenzitických ocelí. Jsou charakterizovány nízkým obsahem C a N pod 0,030 %, 11–13 % Cr, 2–6 % Ni a 2–3 % Mo a velmi nízký obsah síry. Struktura je tvořena nízkouhlíkovým jemnozrnným popuštěným martenzitem bez  $\delta$  feritu. Oceli mají zlepšenou houževnatost, vysokou pevnost a dobrou svařitelnost [1].

Využívají se pro prostředí obsahující plyny vysoké agresivity (dáno obsahem  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2\text{S}$ , teplotou a pH) [1].

### 1.1.4 Dvoufázové korozivzdorné oceli (duplexní oceli)

Nové metalurgické postupy umožňují výrobu modifikovaných korozivzdorných ocelí s vyšší korozní odolností, přizpůsobených požadavkům na konstrukční materiály především v chemickém a leteckém průmyslu. Struktura je tvořena vyváženou dvoufázovou strukturou s vyšší pevností a dobrou odolností vůči koroznímu praskání za napětí.

Nejvýznamější skupinou duplexních ocelí jsou **austeniticko–feritické oceli** s obsahem 40 až 60 % feritu. Chemické složení ocelí je založeno na 21–28 % Cr, 3,5–8,0 % Ni a obsahu C pod 0,02 % C. Obsah křemíku je omezen do 1 %, obsah síry do 0,015 % a obsah fosforu do 0,035 % [4].

Oceli jsou dobře svařitelné, tepelně je lze zpracovávat jako oceli austenitické, mají lepší obrobitelnost a vyšší mez kluzu než austenitické oceli. Dobrá odolnost proti koroznímu praskání v prostředí obsahujícím chloridy i ve vysoké koncentraci a v mořské vodě. Vyšší odolnost proti bodové korozi než u austenitických ocelí [1].

Hodnota odolnosti je dána ekvivalentem  $PRE > 40$  (Pitting Resistance Equivalent) [4]:

$$PRE = \% Cr + 3,3 + Mo + 16 \text{ až } 30 \% Ni \quad (1.3)$$

Nevýhodou je dlouhodobá expozice v rozmezí teplot 280 až 500 °C, kdy dochází ke stárnutí a zkrěhnutí materiálu. Rovněž se nedoporučují pro prostředí, kde vzniká atomární vodík – vodíková křehkost [1].

Další skupinou duplexních ocelí jsou **martenziticko–feritické oceli** s 13 % Cr a velmi nízkým obsahem C (max. 0,04 %), obsahem S a P do 0,008 % a zvýšeným obsahem Mo 1,5 %. Struktura je tvořena asi 20 % feritu, zbytek je martenzit a vyloučené karbidy. Korozní odolnost je oproti feritickým 13 % ocelím vyšší, mají zlepšenou tvařitelnost v širokém rozsahu teplot, dobrou svařitelnost [1].

Martenziticko-austenitické oceli obsahují 13–16 % Cr, cca 0,06 % C, 4–6 % Ni a max. 2 % Mo. Struktura je tvořena asi 25 % austenitu, zbytek je martenzit. V některých případech (vyšší obsah Cr a Mo) se může vyloučit i  $\delta$  ferit [1].

Oceli se vyznačují odolností proti křehkému lomu, dobrou tažností, vysokou pevností, odolností proti kavitaci a jsou dobře svařitelné [1].

### 1.1.5 Precipitačně vytvrditelné korozivzdorné oceli

Charakteristickou vlastností těchto korozivzdorných ocelí je získávání požadovaných mechanických vlastností tzv. vytvrzováním. Vytvrzování lze provádět na již obrobeném dílu při relativně nízkých teplotách, kdy nedochází k povrchové oxidaci, ani k deformacím materiálu. To je jejich výhodou oproti martenzitickým ocelím, které je třeba k dosažení požadované pevnosti kalit a popouštět. U austenitických ocelí lze zase mechanické vlastnosti ovlivnit pouze chemickým složením nebo tvářením při normální teplotě [1].

Tyto oceli lze podle struktury rozdělit na dvě skupiny:

**Martenzitické precipitačně vytvrditelné oceli** – v průběhu tepelného zpracování dochází nejprve při rozpouštěcím žíhání a následném rychlém ochlazení k martenzitické přeměně a poté při nízkých teplotách dochází k precipitaci - vytvrzení. Při vytvrzování mezi 400 až 500° C dle chemického složení, se z martenzitu vylučují fáze typu  $\text{Ni}_3\text{Ti}$  a  $\text{Ni}_3\text{Cu}$ , které vyvolávají růst pevnosti na 1300 až 1500 MPa. Využití těchto ocelí je v letectví, kosmonautice, lodním průmyslu apod. [1].

**Austenitické precipitačně vytvrditelné oceli** – tyto oceli lze zjednodušeně popsat jako oceli austenitické, obsahující precipitačně vytvrzující prvky (Ti, Al, V). Vysokých pevností se dosahuje precipitací karbidů, nitridů nebo intermetalických sloučenin typu  $\text{Ni}_3\text{Ti}$  a  $\text{Ni}_3\text{Cu}$ . Výhody jsou obdobné jako v případě martenzitických precipitačně vytvrditelných ocelí. Korozní odolnost je na stejné úrovni jako u austenitických ocelí. Využívají se v petrochemickém a leteckém průmyslu, pro vysokonamáhané součásti (tryskové motory, turbínová kola, ventilátory), pro zařízení pracující při nízkých i vysokých teplotách [1].

## 1.2 Značení korozivzdorných ocelí

Korozivzdorné oceli je možné označit několika různými způsoby. Asi nejpoužívanější značení pro evropský trh je značení dle normy EN 10 027-1 a EN 10 027-2. V České republice se stále používá klasické označení podle původní ČSN 42 0002. Pro americký trh je určeno značení dle AISI, SAE (AMS), ASTM a UNS.

### 1.2.1 Evropské značení

Původní norma ČSN 42 0002 zařazuje korozivzdorné, žáruvzdorné, žáropevné a speciální oceli do třídy 17.

Označení se skládá ze šesti číslic - 41 7xxx. První číslice 4 - významově značí hutní materiál (v běžné praxi se čtyřka vynechává), 1 - označuje tvářenou ocel, 7 - korozivzdornou ocel. Čtvrtá číslice definuje hlavní legující prvky (viz Tab. 1).

**Tab. 1** Legující prvky podle čtvrté číslice [8].

41 7Xxx	Hlavní legující prvek nebo skupina prvků
0	Cr
1	Cr s dalšími legujícími prvky, např. Al, Mo, Ni
2	Cr-Ni, popř. stabilizované (Ti, Nb)
3	Cr-Ni, popř. stabilizované (Ti, Nb), s dalšími legujícími prvky (Mo, V, W)
4	Mn-Cr, Mn-Cr-Ni
5	Ni
6	Mn
7	oceli se zvláštními kombinacemi prvků
8	
9	

Pátá a šestá číslice slouží k jemnějšímu rozlišení ocelí [8].

Pro evropský trh je mnohem častější značení podle EN 10027-1 a EN 10027-2. Norma EN 10027-1 řeší značení ocelí kombinací písmen a čísel. Pro korozivzdorné ocele platí obecná značka  $X\ nnn\ aaa\ n-n$ , kde  $X$  - značí korozivzdornou ocel,  $nnn$  – stonásobný střední obsah uhlíku,  $aaa$  – chemické značky legujících prvků seřazených sestupně podle obsahu,  $n-n$  – střední obsah legujících prvků v pořadí podle  $aaa$  [1].

Příklady:

- X20Cr13 = 0,20 % C, 13 % Cr,
- X8CrNiMo18-12-3 = 0,08 % C, 18 % Cr, 12 % Ni, 3 % Mo,
- X1CrNiMo22-5-3 = 0,01 % C, 22 % Cr, 5 % Ni, 3 % Mo.

Korozivzdorné oceli podle norma EN 10027-2 mají pouze číselnou formu podle schématu *1.4xxx*, kde *1* – označuje obecně ocel a *4* – korozivzdorné oceli. Třetí číslice upřesňuje obsah legujících prvků – viz Tab. 2.

**Tab. 2** Význam třetí číslice pro korozivzdorné ocele [9].

<b>1.4Xxx</b>	<b>Chemicky odolné oceli</b>
0	korozivzdorné oceli s méně než 2,5 % Ni, bez Mo, Ti, Nb
1	korozivzdorné oceli s méně než 2,5 % Ni, s Mo, bez Ti, Nb
2	
3	korozivzdorné oceli s $\geq 2,5$ % Ni, bez Mo, Ti, Nb
4	korozivzdorné oceli s $\geq 2,5$ % Ni, s Mo, bez Ti, Nb
5	korozivzdorné oceli se zvláštními přísadami
6	chemicky odolné a žárovevné slitiny Ni
7	žáruvzdorné oceli s $< 2,5$ % Ni
8	žáruvzdorné oceli s $\geq 2,5$ % Ni
9	vysocepevné žárovevné materiály

Poslední dvě čísla blíže specifikují ocel [1, 9].

### 1.2.2 Americké značení

Před mnoha lety vyvinuly společnosti AISI/SAE a ASTM třímístný systém označení pro korozivzdorné ocele. Tento systém definuje tři základní řady:

- řada 200 – austenitické Cr-Ni-Mn oceli,
- řada 300 – austenitické Cr-Ni oceli,
- řada 400 – feritické a martenzitické chromové oceli.

Tyto řady se dále dělí na jednotlivé třídy ocelí [10].

Později přestala společnost AISI materiálové specifikace uvádět, a proto byla vazba mezi AISI a SAE přerušena. Od roku 1995 vzniká SAE systém. Tento systém využívá k řazení chemického složení uhlíkových ocelí a slitin základní čtyřciferný systém. V celém systému označují poslední dvě číslice obsah uhlíku. Například uhlíková ocel

1045 obsahuje v tomto systému 0,45 % C. U slitin popisují první dvě číslice SAE systému hlavní legující prvky (viz Tab. 3), přičemž první číslice označuje hlavní skupinu ocelí (viz Tab. 4) [10].

**Tab. 3** Hlavní legující prvky podle SAE (výběr) [10].

Označení	Přibližné chemické složení
10xx	obyčejné uhlíkové oceli (nelegované)
11xx	snížený obsah síry
41xx	Cr 0,50 až 0,95 %; Mo 0,12 až 0,30 %
43xx	Ni 1,82 %; Cr 0,50 až 0,80 %; Mo 0,25 %
46xx	Ni 0,85 %, nebo 1,82 %; Mo 0,25 %
47xx	Ni 1,45 %; Cr 0,45 %; Mo 0,12 %, nebo 0,35 %
48xx	Ni 3,50 %; Mo 0,25 %
50xx	Cr 0,27 %, 0,40 %, 0,50 %, nebo 0,65 %
51xx	Cr 0,80 %, 0,87 %, 0,92 %, 1,00 %, nebo 1,05 %
51xxx	Cr 1,02 %, C min. 1,00 %

**Tab. 4** Hlavní druhy ocelí dle SAE [10].

SAE systém	Druh ocelí
1xxx	uhlíková ocel
2xxx	Ni ocel
3xxx	Ni-Cr ocel
4xxx	Mo ocel
5xxx	Cr ocel
6xxx	Cr-V ocel
7xxx	W ocel
8xxx	Ni-Cr-Mo ocel
9xxx	Si-Mn ocel

Dále se u některých ocelí vkládá mezi druhou a třetí číslici písmeno. Písmeno *B* informuje o přídavku 0,0005 až 0,003 bóru kvůli zvýšení tvrdosti. Písmeno *L* znamená přidání 0,15 až 0,35 % olova pro zvýšení obrobitelnosti [10].

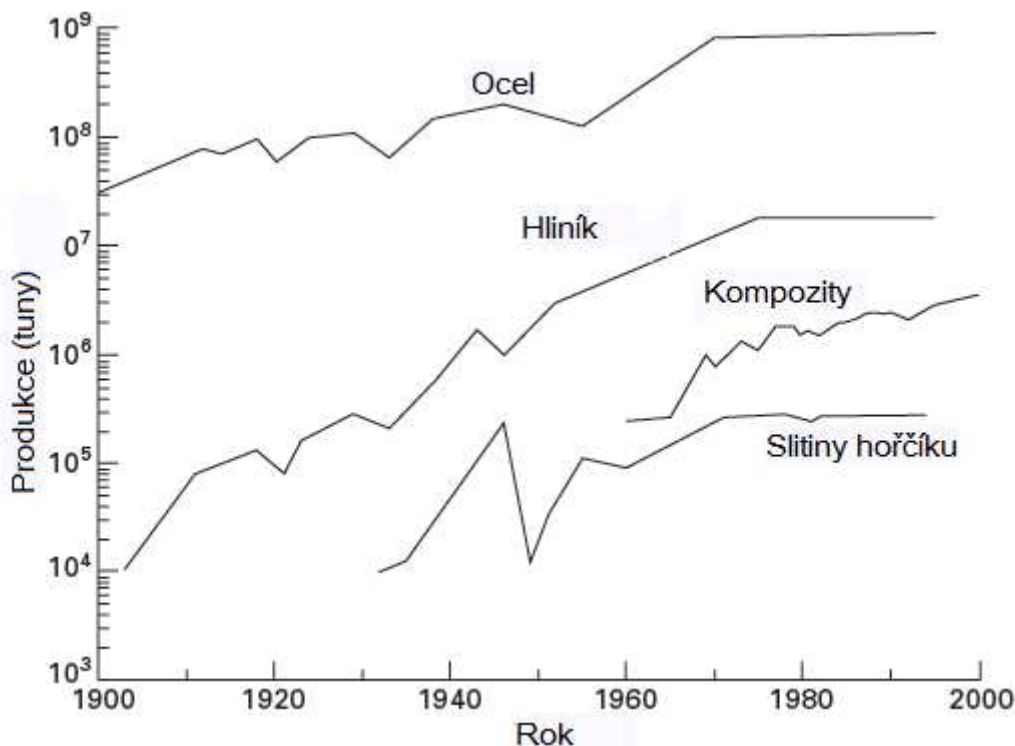
S vývojem nových materiálů se tato označení ukázala jako nedostatečná. Proto společnosti ASTM a SAE zavedly nový způsob značení UNS.

Každé označení UNS se skládá z předpony tvořené jedním písmenem, poté následuje pět číslic. První tři číslice jsou shodné se značením AISI. Poslední 2 číslice přesněji vymezují oceli. Například S40500 je shodné s AISI 405. Písmeno *S* značí korozivzdorná, *405* - feritická ocel pro svařování [14].



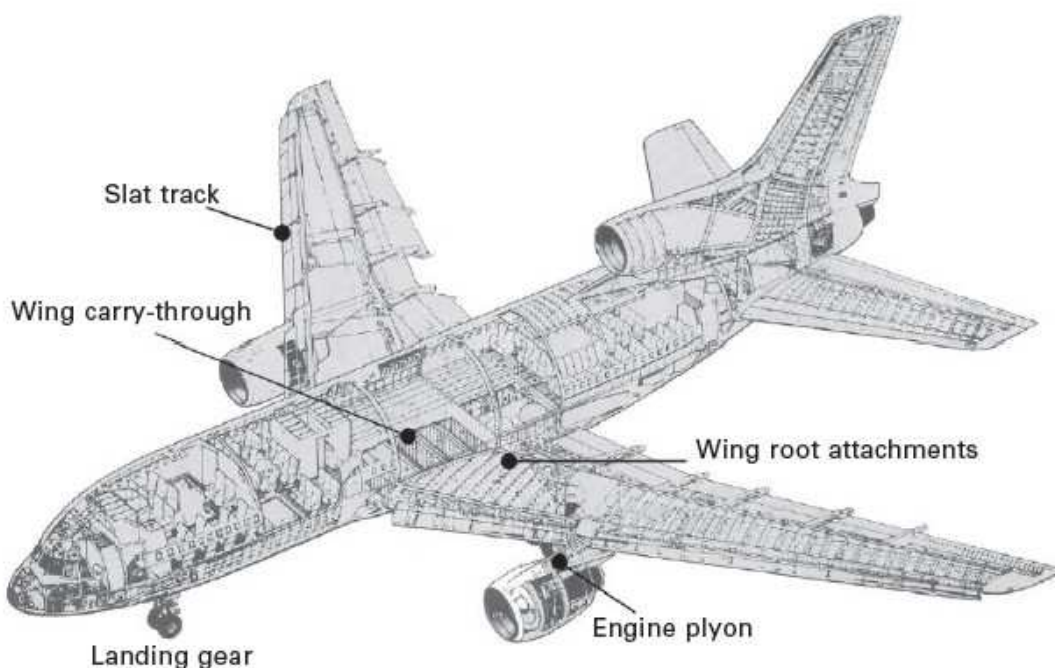
## 2 MARTENZITICKÉ KOROZIVZDORNÉ MATERIÁLY

V současné době existuje velké množství konstrukčních materiálů, z nichž v letecké konstrukci našly uplatnění především vysokopevnostní martenzitické oceli, nazývané také maraging oceli, středně uhlíkové nízkolegované oceli a především precipitačně vytvrditelné korozivzdorné oceli s martenzitickou strukturou. Produkce materiálů v letectví – viz obr. 3.



**Obr. 3** Vývoj produkce materiálů v letecké konstrukci [11].

Tyto oceli se používají v konstrukcích, které vyžadují vysokou pevnost a odolnost, ale kde musí být dosaženo velmi přesných rozměrů, jako jsou například díly podvozku, vodící lišty, díly křídel apod. (viz obr. 4). V průměru tvoří 5–8 % hmotnosti letadla. Výhody použití oceli ve vysoce zatěžovaných leteckých konstrukcích spočívají ve vysoké houževnatosti, pevnosti, odolnosti proti únavě, v lomové houževnatosti a korozivzdornosti. Mezi problémy patří vysoká hmotnost, potenciál vodíkové křehkosti a korozní praskání pod napětím.



**Obr. 4** Konstrukční prvky letadel z oceli. [11]

Maraging ocel se používá na různé letecké komponenty, protože kombinuje velmi vysokou pevnost (asi 2 000 MPa) s dobrou houževnatostí, čímž je zaručena vysoká míra odolnosti proti poškození. Zachovávají vysokou rozměrovou stabilitu při tepelném zpracování, jsou dobře svařitelné. Vzhledem k nízkému obsahu uhlíku nedochází k oduhličení. Tyto vlastnosti jsou dány mikrostrukturou sestávající z tvárné martenzitické matrice posílené o tvrdé intermetalické fáze  $\text{Ni}_3\text{Ti}$  vzniklé při vytvrzování.

Středně uhlíkové nízkolegované oceli také kombinuje vysokou pevnost a houževnatost vlivem martenzitické mikrostruktury zpevněné tvrdými karbidickými precipitáty. Tento typ oceli má podobné mechanické vlastnosti jako vysokopevnostní ocel, ale je náchylnější ke koroznímu praskání pod napětím. Využití v konstrukci leteckých komponentů.

Precipitačně vytvrzené korozivzdorné oceli s martenzitickou strukturou jsou nejvíce rozšířeny. Vyznačují se vysokou pevností a vynikající odolností proti korozi. Jsou využívány u leteckých konstrukcí náchylných ke koroznímu praskání. Mikrostruktura sestává z martenzitu a precipitačních částic. Vysoká odolnost proti korozi je dána chromovou oxidační vrstvou, která je nepropustná pro korozivní plyny a kapaliny [3, 11].

## 2.1 Vysokopevnostní ocel – maraging

Tyto niklové martenzitické vytvrditelné oceli patří mezi nejpevnější homogenní materiály. Jejich název je odvozen ze spojení dvou za sebou následujících fázových přeměn vyvolávajících zpevnění: přeměny martenzitické (*martensite*) a stárnutí (*age-hardening*) – maraging.

Chemické složení maraging oceli (viz obr. 5) je založeno na velmi malém množství uhlíku (max. 0,03 %) a poměrně velkém obsahu niklu (17–19 %). Dalšími prvky jsou kobalt (8–12 %), molybden (3–5 %), titan (0,2–1,8 %) a hliník (0,10–0,15 %). Nikl tvoří se železem tuhý roztok, jehož obsah je nutné volit s ohledem na tvorbu metastabilního austenitu po tepelném zpracování a následnou transformaci na martenzit při normální nebo zvýšené teplotě. Se stoupajícím obsahem Ni se zvyšuje pevnost. Obsah uhlíku je udržován co nejnižší, aby se zabránilo tvorbě karbidu titanu (TiC). Pokud jsou přítomny ve vysoké koncentraci, karbidy značně snižují plastické vlastnosti.

Kobalt snižuje rozpustnost molybdenu v martenzitické matici, takže ovlivňuje při vytvrzování vznik precipitátů na bázi molybdenu.  $\text{Ni}_3\text{Mo}$  nebo  $\text{Fe}_2\text{Mo}$  zvyšují pevnost martenzitu. Kobalt rovněž urychluje proces vytvrzování a zkracuje dobu k dosažení maximální tvrdosti.

Pevnost po vytvrzování je nejvíce ovlivňována titanem, který je vylučován jako  $\text{Ni}_3\text{Ti}$ . Přísada 0,10 až 0,15 % Al silně podporuje účinnost vytvrzování. S vyšším obsahem hliníku klesá houževnatost [3, 11, 12].

Ocel	Složení	Pevnost (MPa)	Max. pevnost (MPa)	Tažnost (%)
<b>Maraging steels</b>				
18Ni (200)	0.03 max C, 18 Ni, 8.5 Co, 3.3 Mo, 0.2 Ti, 0.1 Al	660	970	17
18Ni (250)	0.03 max C, 18 Ni, 8.5 Co, 5 Mo, 0.4 Ti, 0.1 Al	1700	1790	11
18Ni (300)	0.03 max C, 18 Ni, 9 Co, 5 Mo, 0.7 Ti, 0.1 Al	1950	2000	9
18Ni (350)	0.03 max C, 18 Ni, 12.5 Co, 4.2 Mo, 1.6 Ti, 0.1 Al	2300	2370	6
<b>Medium-carbon low-alloy steels</b>				
4130	0.3 C, 1.0 Cr, 0.5 Mn, 0.25 Si, 0.2 Mo	540	700	25
4340	0.4 C, 1.8 Ni, 0.8 Cr, 0.7 Mn, 0.25 Si, 0.25 Mo	410	750	22
300M	0.38 C, 1.8 Ni, 1.6 Si, 0.8 Cr, 0.8 Mn, 0.4 Mo, 0.05 min V	1590	1930	7
Aermet 100	0.25 C, 13.5 Co, 11 Ni, 3 Cr, 1.2 Mo	1720	1960	14
H11	0.35 C, 5.0 Cr, 1.5 Mo, 1.0 Si, 0.45 V, 0.4 Mn, 0.3 Ni	1650	2000	9
<b>Precipitation-hardening stainless steels</b>				
15-5 PH	0.07 C, 15 Cr, 4.5 Ni, 3.5 Cu, 1 Mn, 1 Si, 0.3 Nb	1400	1470	10
17-4 PH	0.07 C, 16 Cr, 4 Ni, 4 Cu, 1 Mn, 1 Si, 0.3 Nb	1150	1330	10

**Obr. 5** Chemické složení a mechanické vlastnosti vybraných ocelí [11].

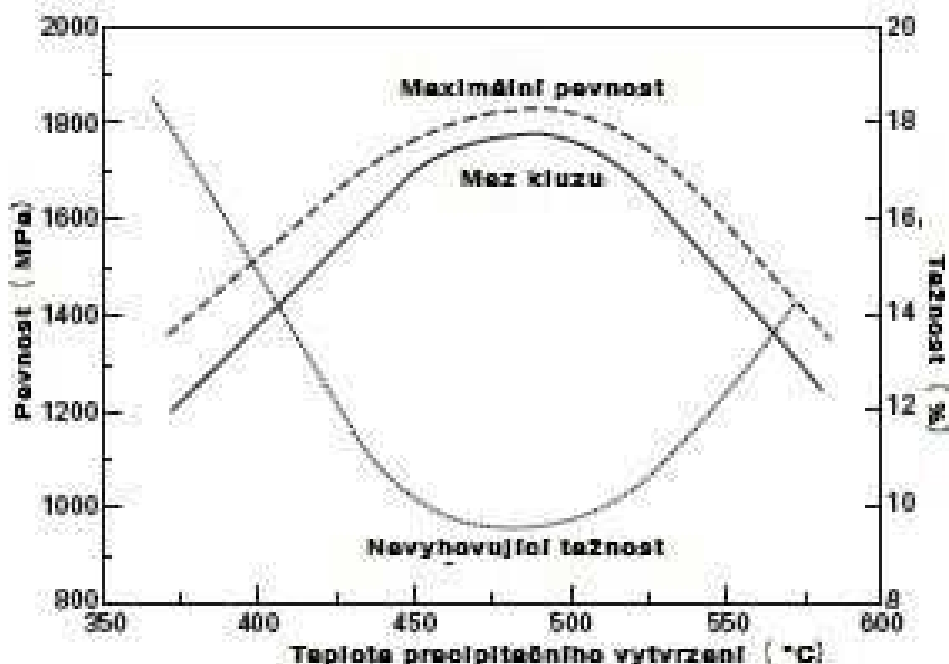
### 2.1.1 Tepelné zpracování

Vysoké mechanické vlastnosti získávají maraging oceli tepelným zpracováním – kalením a vytvrzováním. Teplota austenitizace je v rozmezí 800° až 840° C, výdrž na teplotě bývá 30 až 60 minut. Tyto podmínky zaručují dostatečné rozpuštění částic v austenitu a zároveň snižují pnutí, které vzniklo při předchozím zpracování. Následuje ochlazení do oleje nebo vody za vzniku martenzitické struktury [3, 11].

Vzhledem k vysokému obsahu Ni nemá rychlost ochlazování podstatný význam. Vlivem obsahu Ni (min 15%) dochází k výrazné teplotní hysterezi mezi přeměnou  $\alpha \rightarrow \gamma$  při ochlazování a při ohřevu. Volbou obsahu Ni je z jedné strany snaha maximálně prodloužit tuto hysterezi s cílem zabezpečit stabilitu martenzitu do co nejvyšší teploty, z druhé strany získat během ochlazování strukturu složenou výlučně z martenzitu (při  $Ni \leq 18\%$ ). Po kalení tvoří strukturu prakticky měkký „niklový“ martenzit, pro který je charakteristická velká plasticita  $A = 15$  až  $20\%$ ,  $Z = 50$  až  $80\%$ ,  $R_p = 800$  až  $1\,000$  MPa, poměrně nízká tvrdost (30–35 HRC), pevnost v tahu 900 až 1 200 MPa a dobrá obrobitelnost. Vzhledem k velmi nízkému obsahu uhlíku má martenzit dobrou houževnatost. Vysoká mez kluzu je dána vysokou hustotou dislokací, která je u martenzitu cca  $10^{11} \text{ cm}^{-2}$  [3, 11, 12].

V zakalené struktuře se připouští malé množství zbytkového austenitu (obvykle do 10 %). V případě většího obsahu je nutné provést vymražení.

Po zakalení prochází vysokopevnostní oceli finální fází zvyšování pevnosti – teplotním stárnutím (vytvrzováním). Vytvrzování probíhá obvykle při teplotách 450° až 500° C po dobu několika hodin s následným ochlazováním na vzduchu. Během stárnutí se v měkkém martenzitu vysráží jemné částice intermetalických fází, obsahující hlavně Mo a Ti ( $Ni_3Mo$ ,  $Ni_3Ti$ ,  $Ni_3Al$ ,  $Fe_2Mo$ ). Volbou optimální teploty a času lze dosáhnout meze kluzu kolem 2 000 MPa při zachování dobré tažnosti a houževnatosti (viz obr. 6) [3, 11, 12].



Obr. 6 Vliv teploty vytvrzování na pevnost a tažnost u maraging ocelí. [11]

Uvedené tepelné zpracování zabezpečuje optimální kombinaci pevnosti a plasticity s vysokou odolností proti lomu a šíření trhlin. Nárůst rozměrů při tepelném zpracování nepřekračuje 0,05 % objemu (konvenční oceli do 1,5 %), rovněž smrštění při stárnutí je minimální, proto je možné provádět dokončovací operaci před stárnutím. [3, 11].

## 2.2 Precipitačně vytvrditelné oceli

Precipitačně vytvrditelné korozivzdorné oceli jsou dostupné od 40. let, kdy byla představena první precipitačně vytvrditelná slitina s typovým označením Stainless W ( $\text{Fe-0.07C-0.50Mn-0.50Si-16.75Cr-6.75Ni-0.80Ti-0.20Al}$ ). Od té doby vzniklo mnoho nových precipitačně vytvrditelných korozivzdorných ocelí. Především proto, že letecký a kosmický průmysl i vojenský průmysl vyžadovaly slitiny s kombinací poměrně vysoké pevnosti a nízké hmotnosti ve spojení s dobrou odolností proti korozi [18].

Tyto ocelové slitiny obsahující především chrom a nikl, poskytují optimální kombinaci vlastností martenzitických a austenitických ocelí. Stejně jako martenzitické oceli dosahují vysokých hodnot pevnosti tepelným zpracováním, odolnost korozi je na úrovni austenitických ocelí. Pro zvýšení tvrdosti jsou přidávány některé další legury – měď, hliník, titan, niob, molybden [19].

Výhodou precipitačně vytvrditelných ocelí je, že mohou být dodávány ve stavu po rozpouštěcím žhání, který má dobrou obrobiteľnost. Hotový obrobek lze vytvrzovat za poměrně nízkých teplot, kdy nedochází k deformacím ani k povrchové oxidaci [19].

UNS No.	AISI	Název (a)	Složení (b), %										Ostatní
			C	Cr	Ni	Mn	Si	Ti	Al	Mo	N		
Martensitic grades													
S17600	635	Stainless W	0.08	15.0–17.5	6.0–7.5	1.0	1.0	0.4–1.2	0.40	...	...	...	...
S17400	630	17-4PH	0.07	15.5–17.5	3.0–5.0	1.0	1.0	...	...	...	...	0.15–0.45 Nb, 3.0–5.0 Cu	...
S15500	...	15-5 PH (XM-12)	0.07	14.0–15.5	3.5–5.5	1.0	1.0	...	...	...	...	0.15–0.45 Nb, 2.5–4.5 Cu	...
S16600	...	Croloy 16-6 PH	0.045	15.0–16.0	7.0–8.0	0.70–0.90	0.5	0.3–0.5	0.25–0.40	...	...	...	...
S45000	...	Custom 450 (XM-25)	0.05	14.0–16.0	5.0–7.0	1.0	1.0	...	...	0.5–1.0	...	1.25–1.75 Cu, Nb = 8 × C min	...
S45500	...	Custom 455 (XM-16)	0.05	11.0–12.5	7.5–9.5	0.50	0.50	...	...	0.50	...	0.10–0.50 Nb, 1.5–2.5 Cu	...
S13800	...	PH 13-8 Mo (XM-13)	0.05	12.25–13.25	7.5–8.5	0.20	0.10	...	0.90–1.35Al	2.0–2.5	0.01	...	...
S36200	...	Almar 362 (XM-9)	0.05	14.0–14.5	6.25–7.0	0.50	0.30	0.55–0.9	...	...	...	...	...
Semiaustenitic grades													
S17700	631	17-7 PH	0.09	16.0–18.0	6.5–7.75	1.0	1.0	...	0.75–1.5	...	...	...	...
S15700	632	PH 15-7 Mo	0.09	14.0–16.0	6.5–7.25	1.0	1.0	...	0.75–1.5	2.0–3.0	...	...	...
S35000	633	AM-350	0.07–0.11	16.0–17.0	4.0–5.0	0.50–1.25	0.50	...	...	2.5–3.25	0.07–0.13	...	...
S35500	634	AM-355	0.10–0.15	15.0–16.0	4.0–5.0	0.50–1.25	0.50	...	...	2.5–3.25	0.07–0.13	...	...
S14800	...	PH 14-8 Mo (XM-24)	0.05	13.75–15.0	7.5–8.75	1.0	1.0	...	0.75–1.5	2.0–3.0	...	...	...
Austenitic grades													
S66286	660	A-286	0.08	13.5–16.0	24.0–27.0	2.0	1.0	1.9–2.35	0.35	1.0–1.5	...	0.10–0.50 V, 0.001–0.01 B	...

**Obr. 7** Složení precipitačně vytvrditelných ocelí (výběr) [19].

Na základě konečné mikrostruktury po rozpouštěcím žhání se precipitačně vytvrditelné oceli dělí na martenzitické, semiaustenitické a austenitické. Zatímco některé z těchto ocelí můžeme zařadit na základě číslovacího systému AISI, mnohem častěji se řadí podle ustanovení UNS nebo patentovaných názvů slitin. Některé vybrané oceli zobrazuje obr. 7 [18].

**Martenzitické precipitačně vytvrditelné korozi-vzdorné oceli** jsou nejpoužívanějšími ocelmi tohoto typu v leteckém průmyslu. Typickým představitelem této řady je ocel 17-4PH (UNS S17400). Název je odvozen od obsahu 17 % Cr a 4 % Ni. Rozpouštěcí ohřev probíhá za vysokých teplot 1 040–1 065 °C a transformují během ochlazování na nízkouhlíkový martenzit. Následné vytvrzování za středně vysoké teploty iniciuje precipitaci druhé fáze, kterou může být intermetalická složka nebo zpevňující přísada, například měď [18, 19].

**Semiaustenitické precipitačně vytvrditelné korozi-vzdorné oceli**, např. 17-7PH (UNS S17700), mohou být ochlazeny z jejich rozpouštěcí teploty na pokojovou teplotu bez vzniku martenzitické matrice, přičemž po zchlazení zůstává poněkud jemný austenit. Poté prochází stárnutím za iniciační teploty, která způsobuje precipitaci karbidů nebo intermetalické složky. Tato precipitace odstraňuje z tuhého roztoku některé legující prvky a někdy i uhlík, což destabilizuje austenit a dovoluje mu přeměnit se na martenzit během ochlazování z teploty stárnutí. Teploty  $M_s$  leží hluboko pod okolní teplotou, proto přeměna na martenzit probíhá při velmi nízkých teplotách [18, 19].

**Austenitické precipitačně vytvrditelné korozivzdorné oceli** obsahují dostatek legujících prvků podporujících vznik austenitu, aby v průběhu ochlazování z rozpouštěcí teploty 1 095–1 120 °C vznikl stabilní austenit. Stabilní austenit zůstává zachován i poté, co dojde k precipitaci intermetalických složek. Teploty  $M_s$  jsou tak nízké, že nemůže dojít k přeměně austenitu na martenzit. V případě těchto ocelí dochází k vytvrzování slitin jen s pomocí precipitátů. Ve výsledku nemohou austenitické precipitačně vytvrditelné korozivzdorné oceli dosáhnout tak vysoké pevnost v tahu jako martenzitické nebo semiaustenitické. Nejpoužívanější ocelí je A-286 (UNS S66286), která je předchůdcem superslitin [18, 19].

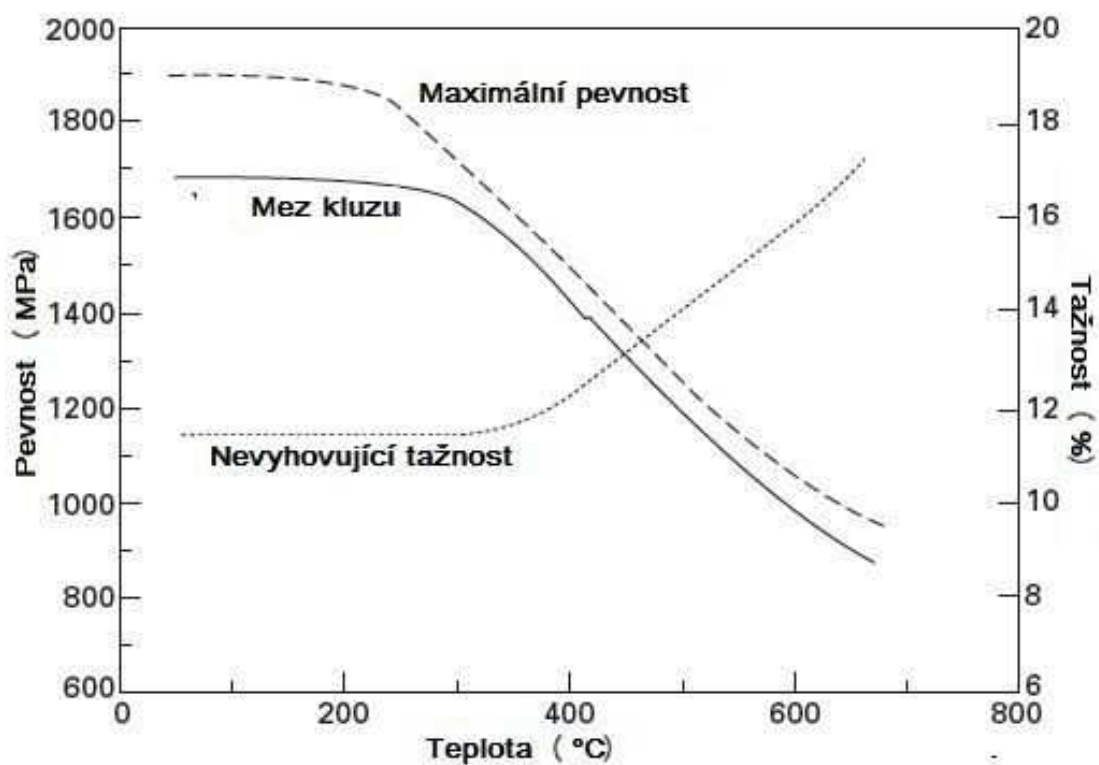
### 2.3 Středně uhlíkové nízkolegované oceli

Chemické složení těchto ocelí je založeno na obsahu uhlíku v rozmezí 0,25 až 0,50 % a vyšší koncentraci legujících prvků, které mají zvýšit tvrdost a odolnost při vysokých teplotách. Jsou to mangan, nikl, chrom, vanad, bor. Martenzitická struktura zpevněná tvrdými karbidickými precipitáty splňuje požadavky na vysokopevnostní ocel, ale vlivem tvrdých karbidů je náchylnější ke koroznímu praskání pod napětím [3, 11].

Existuje mnoho druhů středně uhlíkových nízkolegovaných ocelí, z nich nejčastěji využívané v letecké konstrukci jsou typy 4340, 300M a H11, které pokrývají rozsah od střední pevnosti až po vysokou pevnost, mají dobrou houževnatost, odolnost proti tečení (creep) a odolnost proti únavě [3, 11].

Tyto oceli jsou ochlazovány z austenitické oblasti, vzniká martenzitická struktura. Požadovaných pevností je dosahováno žiháním. Mechanické vlastnosti vybraných ocelí je možné vidět na obr. 5. Vliv žihacích teplot na mechanické vlastnosti oceli 4340 znázorňuje obr. 8. Letecké aplikace pro tuto ocel zahrnují součásti podvozků, hřídele a další komponenty [11].





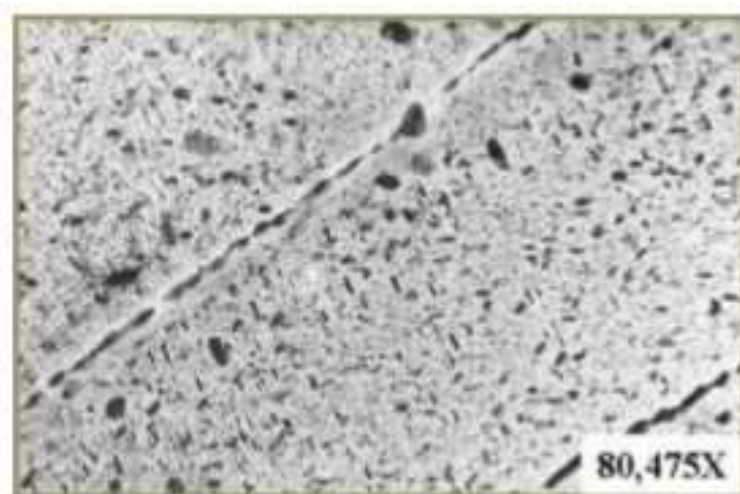
**Obr. 8** Vliv žhací teploty na mechanické vlastnosti oceli 4340 [11].

### 3 PRECIPITAČNÍ VYTVRZOVÁNÍ

Precipitační vytvrzování je tepelný proces využíváný ke zlepšení pevnostních charakteristik slitin (slitiny hořčíku, hliníku, některých slitin mědi a také slitin železa). Vytvrditelnost slitin je založena na předpokladu [15]:

- relativně měkká a tvárná matrice (tuhý roztok), naopak tvrdý a křehký precipitát (zpravidla intermediální fáze),
- dostatečné množství legujícího prvku v tuhém roztoku s dobrou rozpustností v pevném stavu,
- materiál musí snášet rychlé ochlazení (vnitřní tepelné pnutí, praskání),
- tvorba koherentních precipitátů.

Z přesyceného roztoku se začne vylučovat ta intermediální fáze, která bude bohatší na prvek, kterým je původní fáze přesycena. Vznikají velice jemné (desítky až stovky nm) částice – precipitáty (obr. 9), které brání pohybu dislokací, nebo defektů v krystalové mřížce (nárůst pevnosti  $R_m$  a tvrdosti). Protože dislokace jsou často hlavními nositeli plasticity, je tato vlastnost potlačena a dochází k vytvrzování [14].



**Obr. 9** Jemné částice – precipitáty [17].

Precipitační rozklad lze obecně popsat jako:

$$\alpha' \Rightarrow \alpha + \beta \quad (3.1)$$

kde:  $\alpha'$  – přesycený tuhý roztok,

$\alpha$  – měkká a tvárná matrice (tuhý roztok)

$\beta$  – precipitující (sekundární) fáze.

Podoba této precipitující fáze se netvoří přímo, ale je sledem fázových přeměn, které vedou k homogenní disperzi nanometrických koherentních, nebo semikoherentních precipitátů v měkké a houževnaté matrici. Koherentní precipitáty (viz obr. 10b) mnohem lépe brání pohybu dislokací než precipitáty nekoherentní – větší zpevňující účinek (viz obr. 10a) [15].

Obecně lze sekvenci přeměn popsat:

$$\alpha' \Rightarrow \alpha'' + \text{zóny GPI} \Rightarrow \alpha'' + \text{zóny GPII} \Rightarrow \alpha + \theta' \Rightarrow \alpha + \theta \quad (3.2)$$

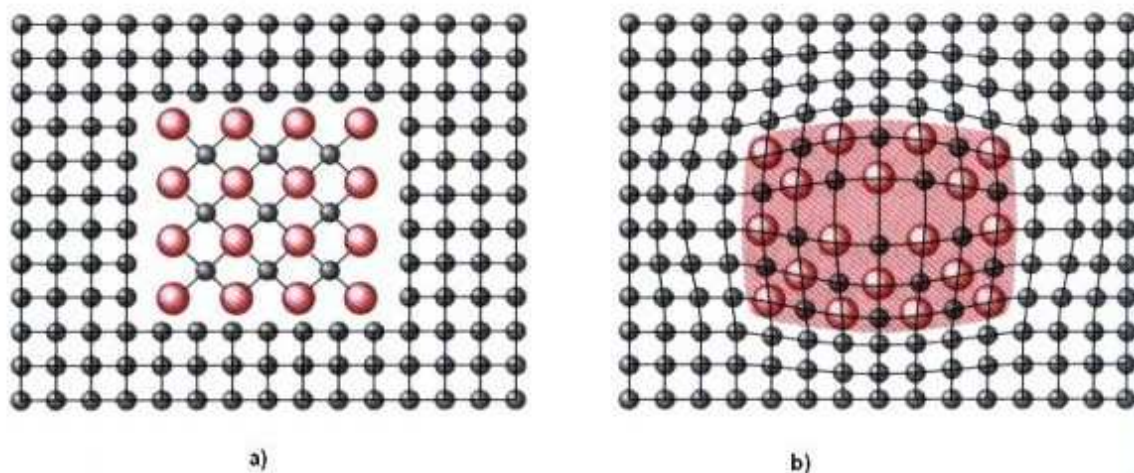
kde:  $\alpha'$ ,  $\alpha''$  - přesycené tuhé roztoky,

GPI - Guiner–Prestonovy zóny I tvoří shluky atomů vylučované fáze, koherentní rozhraní s matricí,

GPII - Guiner–Prestonovy zóny II tvoří přechod mezi shluky atomů a precipitátem, semikoherentní,

$\theta'$  - přechodný precipitát může být koherentní s matricí  $\alpha$ , nebo semikoherentní,

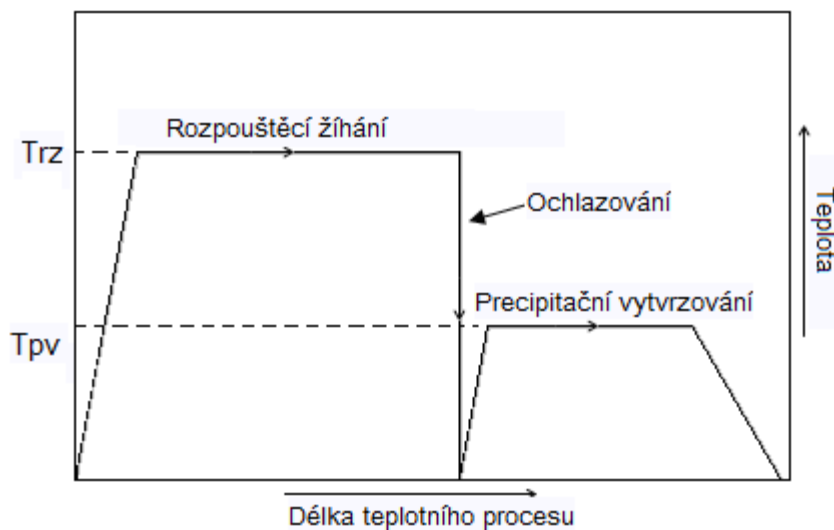
$\theta$  - rovnovážný precipitát, který je nekoherentní s matricí (snížení pevnostních vlastností [15].



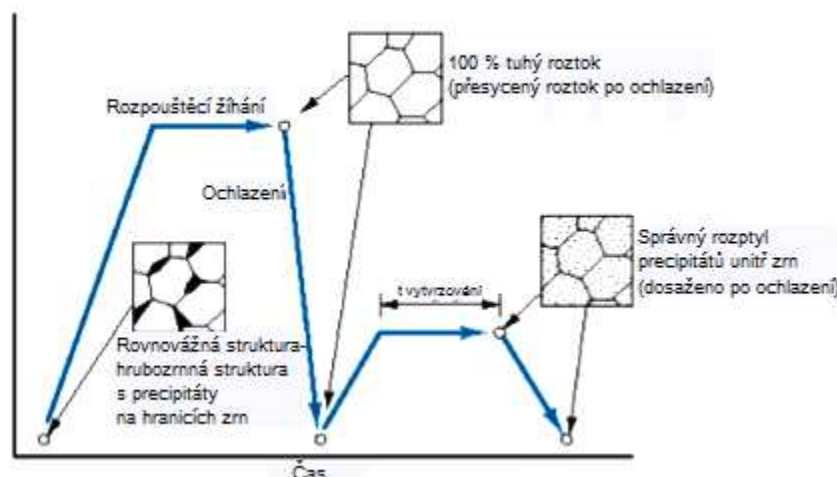
**Obr. 10** a) Nekoherentní, b) koherentní precipitáty [17].

Princip precipitačního vytvrzování (obr. 11, 12) má tři základní kroky:

1. rozpouštěcí žíhání – dosažení homogenního roztoku  $\alpha$ ,
2. rychlé ochlazení – vznik přesyceného roztoku  $\alpha'$ ,
3. vytvrzování – rozpad přesyceného roztoku  $\alpha'$  a vylučování precipitátů.



**Obr. 11** Obecný princip vytvrzování [16].



**Obr. 12** Mikrostruktura v průběhu vytvrzování [17].

### 3.1 Tepelné zpracování

Správné tepelné zpracování vytvrditelných korozivzdorných ocelí je ovlivňováno [20]:

- čištěním před tepelným zpracováním – praní, pískování,
- pecní atmosférou – druh ochranné atmosféry,
- časovými a teplotními cykly,
- změnami v časových a teplotních cyklech.

Teplotní procesy pro martenzitické, semiaustenické a austenitické typy vytvrzovacích ocelí jsou i přes rozdílnou strukturu po vytvrzení (viz Tab. 5) podobné. Vytvrzování je stejně jako např. u hliníkových slitin založeno na 3 krocích:

1. Solution treatment (rozpouštěcí žhání),
2. Transformation cooling (ochlazování)
3. Precipitation hardening (precipitační vytvrzování)

**Tab. 5** Struktury vybraných ocelí po precipitačním vytvrzení [18].

Slitiny	Precipitačně-vytvrzená struktura
<b>martenzitické typy</b>	
PH13-8Mo	koherentní částice NiAl + jemné $\lambda$ částice
15-5PH	plošně středěné krychlové (fcc) Cu částice*
17-4PH	plošně středěné krychlové (fcc) Cu částice
Custom 450	struktura obsahující Fe, Mo, Nb
Custom 455	hexagonální těsně uspořádané koherentní částice Ni <sub>3</sub> Ti
<b>semiaustenitické typy</b>	
17-7PH	prostorově středěná krychlová (bcc) struktura
PH15-7Mo	$\beta$ -NiAl + Ni <sub>3</sub> Al
AM-350	Cr <sub>2</sub> N
AM-355	Cr <sub>2</sub> N
<b>austenitické typy</b>	
A-286	Ni <sub>3</sub> (Al, Ti)

\* stejná struktura jako 17-4PH

### 3.1.1 Rozpouštěcí žihání

Během rozpouštěcího žihání dochází k přeměně heterogenní slitiny na homogenní. Teplota se blíží teplotě solidu. Horní hranice teploty pro rozpouštěcí ohřev je asi 10–15 °C pod teplotou solidu. Teplota pece by neměla překročit toleranci  $\pm 25$  °F (15 °C). Překročení teploty způsobí zhrubnutí zrna, natavení na hranicích zrn – znehodnocení materiálu. Při nižší teplotě dochází k nedokonalému rozpouštění

minoritních fází (karbidy, nitridy) v tuhém roztoku – nedojde ke zlepšení mechanických vlastností [4, 20].

Délka doby výdrže na teplotě závisí na tloušťce materiálu a druhu a velikosti fází. Snahou je tuto dobu co nejvíce minimalizovat. Zbytečným prodlužováním dochází k hrubnutí krystalické struktury a zhoršení vlastností [4].

Doporučené teploty a doby výdrže pro některé martenzitické, semiaustenitické a austenitické typy vytvrditelných ocelí uvádí Tabulka 6 a Příloha 1.

**Tabulka 6** Příklady rozpouštěcího žíhání vybraných ocelí [18, 20].

Ocel	Teplota	Výdrž na teplotě
17-4PH (UNS S17400)	1 035°C (1 900°F) ± 15 °C (± 25°F)	30 minut + 30 minut/25 mm (1 in.)
17-7PH (UNS S17700)	1 065°C (1 950°F) ± 15 °C (± 25°F)	3 minuty + 1 minuta/0,25 mm (0,01 in.)
A-286 (UNS S66286)	900°C (1 650°F) ± 15 °C (± 25°F)	120 minut

### 3.1.2 Ochlazování

Účelem ochlazování z teploty rozpouštěcího žíhání je získání přesyceného tuhého roztoku. Ochlazovací rychlost se volí s ohledem na potlačení opětovného vyloučení minoritních fází, aby zůstala zachována homogenní struktura s dobrou tvárností, houževnatostí a odolností proti korozi. Zároveň zajišťuje finální strukturu ocelí před precipitačním vytvrzováním (martenzitické, semiaustenitické, austenitické typy) [4].

Potřebné ochlazovací rychlosti se dosahuje proudícím vzduchem, nebo zamočením do olejové, či vodní lázně [4]. Aby se zabránilo praskání a sjednotily výsledné vlastnosti, doporučuje se u martenzitických typů ochlazování podle průřezu materiálu takto [20]:

- < 75 mm (3 in.) ochlazení v kalicím oleji, nebo proudícím vzduchem,
- 75–150 mm (3–6 in.) ochlazení proudícím vzduchem,
- > 150 mm (6 in.) ochlazení vzduchem pod ventilátorem.

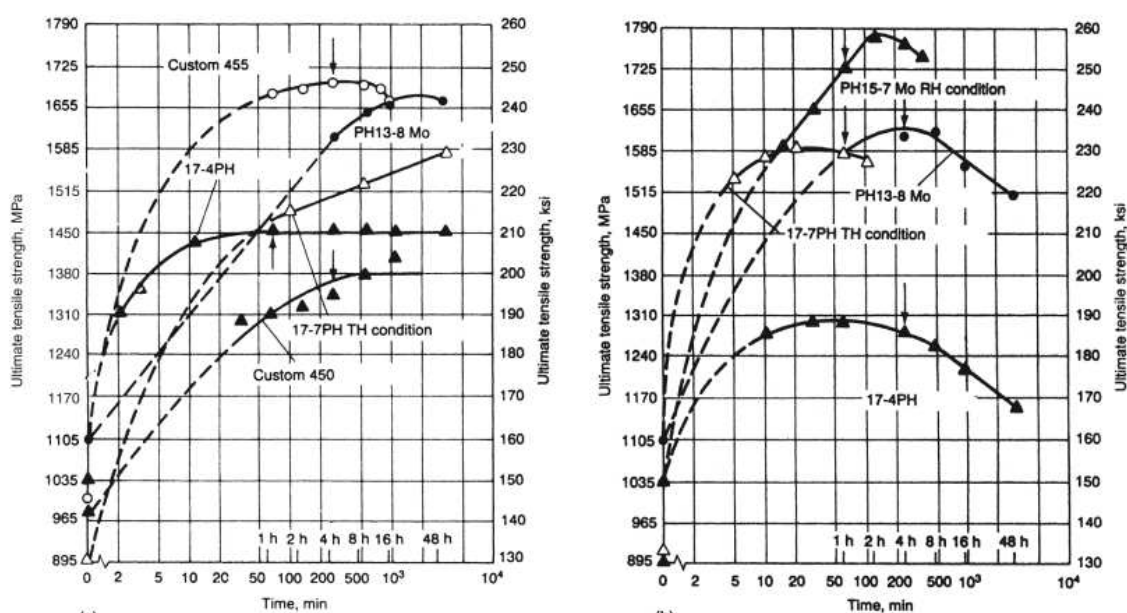


Všechny dílce musí být zchlazeny pod 30 °C (90 °F). Martenzitická přeměna ( $M_s$ ) začíná při nízkých teplotách, typicky kolem 250 °C [20].

Semiaustenitické druhy korozivzdorné oceli tvoří po ochlazení proudícím vzduchem z teploty rozpouštěcího žhání austenitickou strukturu. Proto musí ještě následovat druhý tepelný cyklus (např. u oceli 17-7 PH je 760 °C) před dochlazením na pokojovou teplotu – vzniká martenzitická struktura. Některé semiaustenitické druhy vyžadují pro dokončení transformace následné vymražení na teplotu -60 až -70 °C (-90 °F) po dobu 8 hodin [18, 20]. Příklady ochlazování vybraných ocelí zobrazuje Příloha 1.

### 3.1.3 Precipitační proces

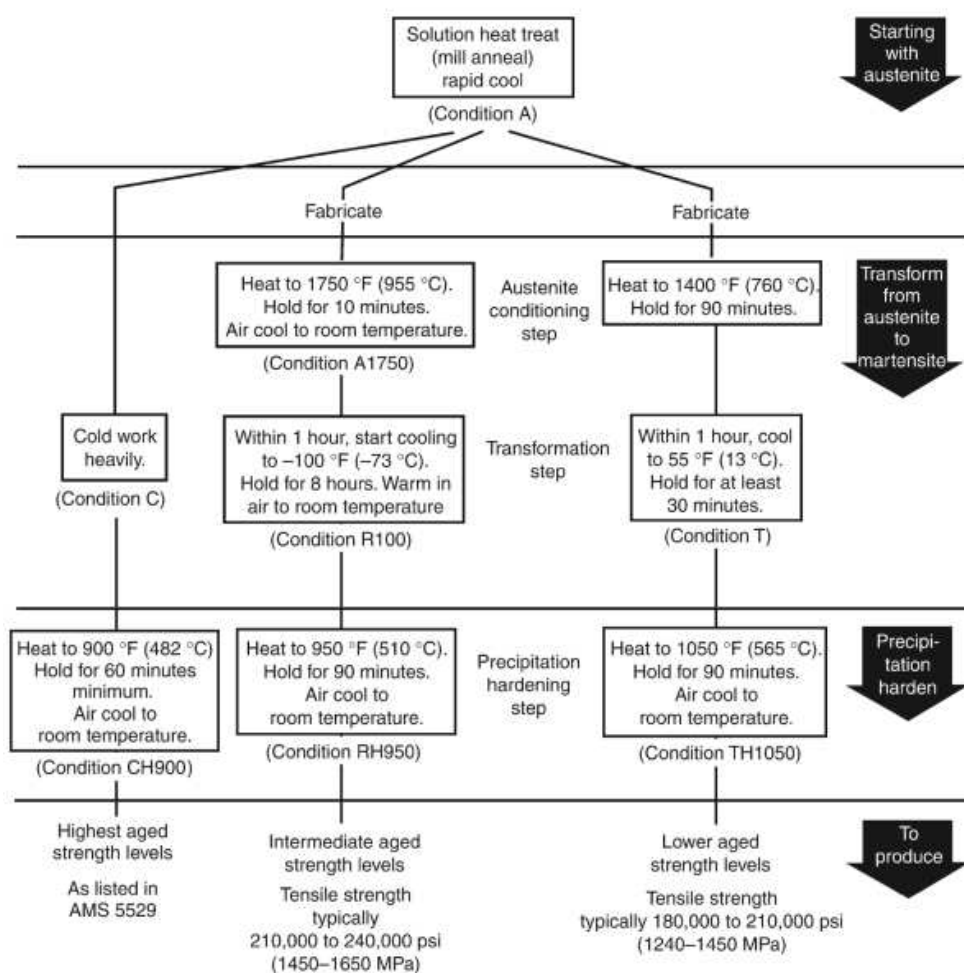
Ve většině případů se provádí na konci výrobního cyklu, nebo těsně před koncem, kdy obrobku je dodávána finální tvrdost. U martenzitických a semiaustenitických druhů se dosahuje maximálního vytvrzujícího účinku v rozmezí teplot 455 až 510 °C (850 až 950 °F). Vyšší teploty zvyšují tažnost a houževnatost, ale zároveň snižují výslednou tvrdost. Rovněž zkracují čas potřebný k průběhu vytvrzení. Typické křivky vybraných martenzitických a semiaustenitických druhů vytvrzovacích ocelí při teplotách 480 °C (900 °F) a 510 °C (950 °F) zobrazuje obr. 13 [18].



**Obr. 13** Mechanické vlastnosti vybraných ocelí při teplotách 480 °C a 510 °C [18].

Martenzitické a semiaustenitické druhy se vytvrzují v rozmezí teplot 480 až 620 °C (900 až 1 150 °F). U austenitických druhů probíhá precipitace v rozmezí 650 až 750 °C (1 200 až 1 380 °F) podstatně déle. Např. k vytvoření téměř maximálního vytvrzení u A-286 je potřeba 16 hodin při teplotě 720 °C (1 325 °F) [20].

Změnou teploty a výdrže na teplotě lze u precipitačně vytvrditelných ocelí dosáhnout široké škály vlastností. Příklad různých vlastností v závislosti na teplotních cyklech pro ocel 17-7PH je na obr. 14. Proto je velmi důležité dodržování předepsaných teplotních standardů, na základě kterých lze přesně stanovit mechanické vlastnosti. V letecké výrobě se stanovením pracovních postupů zabývá standard SAE AMS 2759/3E.



**Obr. 14** Souhrn tepelného zpracování a vlastností pro ocel 17-7 PH [18].

Ukázka teplotních stupňů a mechanických vlastností pro oceli 17-4PH a 17-7PH znázorňují obr. 15 a 16. Teplotní parametry dalších ocelí jsou uvedeny v Příloze 1.

<b>MPa</b>	<b>ksi</b>	<b>°C</b>	<b>°F</b>	<b>h</b>
1310	190	480 ± 5	(900 ± 10)	1
1170	170	495 ± 5	(925 ± 10)	4
1070	155	555 ± 5	(1030 ± 10)	4
1030	150	565 ± 5	(1050 ± 10)	4
1000	145	580 ± 5	(1075 ± 10)	4
930	135	620 ± 5	(1150 ± 10)	4

Obr. 15 Teplotní cykly pro ocel 17-4PH [20].

<b>MPa</b>	<b>ksi</b>	<b>°C</b>	<b>°F</b>	<b>h</b>
1450	210	510 ± 5	(950 ± 10)	1
1240	180	565 ± 5	(1050 ± 10)	1
1170	170	580 ± 5	(1075 ± 10)	1
1035	150	595 ± 5	(1100 ± 10)	1

Obr. 16 Teplotní cykly pro ocel 17-7PH [20].

### 3.2 Pecní zařízení

Řízením procesů tepelného zpracování precipitačně vytvrditelných ocelí v podmínkách leteckého průmyslu, včetně výběru vhodného pecního zařízení, se zabývá norma SAE AMS2759/3E, vydaná mezinárodní organizací SAE Aerospace.

Aby bylo možné predikovat výsledné mechanické vlastnosti, je nutné dodržovat tolerance tepelného procesu dle níže uvedených standardů [21]:

- pro teploty  $\geq 760\text{ }^{\circ}\text{C}$  (1 400  $^{\circ}\text{F}$ ):  $\pm 14\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 25^{\circ}\text{F}$ ),
- pro teploty 704 až 746  $^{\circ}\text{C}$  (1 300 až 1 375  $^{\circ}\text{F}$ ):  $\pm 8\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 15\text{ }^{\circ}\text{F}$ ),
- pro teploty  $< 704\text{ }^{\circ}\text{C}$  (1 300  $^{\circ}\text{F}$ ):  $\pm 6\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{F}$ ).

Důležitou součástí pecních zařízení je ochranná atmosféra. Pece využívající pro tepelné procesy endoatmosféru nebo exoatmosféru, by mohly kontaminovat precipitačně vytvrditelné oceli. Proto se nedoporučují. Vhodným příkladem ochranné atmosféry je argon, helium, vodík nebo vakuum. Pro teploty pod 774  $^{\circ}\text{C}$  (1 425  $^{\circ}\text{F}$ ) lze využít dusík, či dusík-vodíkovou směs. Rovněž lze využít dusík jako chladicí medium ve vakuové peci. Bez ochranné atmosféry dochází k zokoujení povrchu, oduhličení a nežádoucímu zabarvení dílců vlivem oxidace [21].

Nezbytným vybavením vhodného typu pece je osazení řídicími, bezpečnostními a vsázkovými termočládky. Jejich využívání, seřizování a kalibrace se řídí normou SAE AMS2750/E.

## 4 VÝBĚR PECNÍHO ZAŘÍZENÍ

Z hlediska kvality prováděných procesů se výběr pece řídí různými parametry. Asi nejdůležitější jsou:

- požadované procesy tepelného zpracování,
- teplotní rozsah,
- homogenita teplotního pole,
- ochranná atmosféra,
- osazení záznamovými nástroji a jejich přesností,
- rozměry zpracovávaných dílců a kapacita pece.

Nová pec bude prioritně určena na precipitační vytvrzování materiálů AMS5629 (UNS 13800), AMS5659 (UNS 15500), AMS5604 (UNS 17400), vytvrzování titanové slitiny 10V-2Fe-3Al a nízkoteplotní popouštění – viz Tab. 7.

**Tab. 7** Požadované procesy tepelného zpracování pro novou pec.

Materiálová norma	Proces	Teplota	Tolerance
AMS5629	precipitační vytvrzování	510–621 °C	±6 °C
AMS5659	precipitační vytvrzování	482–621 °C	±6 °C
AMS5604	precipitační vytvrzování	482–621 °C	±6 °C
	nízkoteplotní popouštění	180–300 °C	±14 °C
Titanové slitiny	žíhání	482 °C	±8 °C

Požadavky na vybavení pece:

- teplotní rozsah 180° až 700° C,
- homogenita teplotního pole v pracovním prostoru ±6 °C,
- rozměry pracovního prostoru (d x š x v) 900 x 900 x 600 mm,
- hmotnost vsázky 1 000 kg,

- tepelné zpracování bez oxidace povrchu,
- třída 2, záznamové instrumenty B dle AMS2750E.

Pro stanovení velikosti topné komory jsou důležité rozměry největšího zpracovávaného obrobku. Požadováno je minimálně 8 ks hydraulických válců A200405-3 ve vsázce. Maximální rozměry dílce:  $\varnothing$  180 – 550 mm.

#### 4.1 Vybrané zařízení

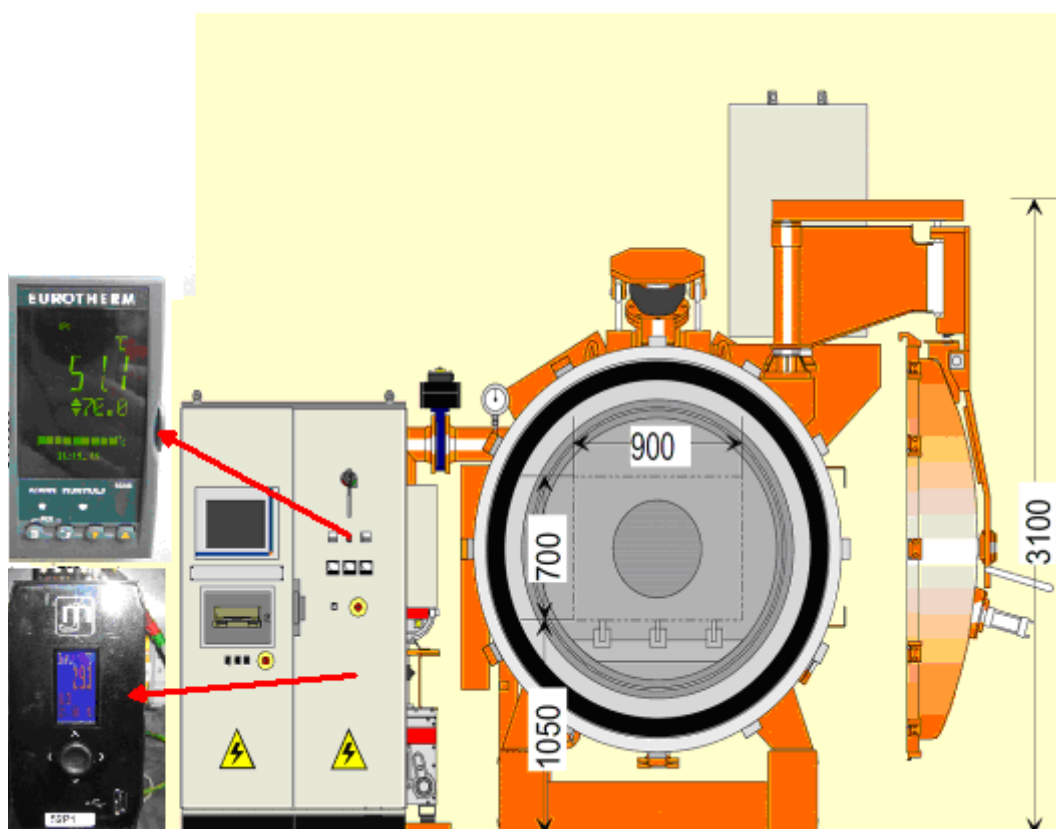
Na základě výše uvedených požadavků a vzhledem k využitelnosti již nainstalovaných periférií (chladicí okruh, rozvody vysokotlakého dusíku a manipulační zařízení) byla vybrána varianta evakuovatelné pece BMI B55R (obr. 17).



**Obr. 17** Pec BMI B55R [22].

## Parametry pece:

- pracovní prostor (d x š x v) 1 200 x 900 x 700 mm (obr. 18),
- maximální hmotnost vsázky 1 000 kg,
- provozní teplota 150 až 750 °C,
- splňuje parametry třídy 2 dle AMS 2750E – homogenita teplotního pole  $\pm 6$  °C,
- osazení instrumenty typu B dle AMS 2750E – kontrolní termočlánek, vsázkový termočlánek, bezpečnostní termočlánek, záznamové zařízení,
- evakuovatelná pec, teplotní proces v dusíkové atmosféře – přetlak v komoře 1 100 mbar, požadovaná čistota dusíku 99,999 %,
- řízený ohřev  $0,5$  °C min<sup>-1</sup> až  $20$  °C min<sup>-1</sup>,
- chlazení pomocí řízeného ventilátoru.



**Obr. 18** Rozměry topné komory [22].



## 5 OVĚŘOVÁNÍ SCHOPNOSTÍ PECE

Zkoušky schopností pece vychází z norem AMS2759/3E Heat Treatment Precipitation-Hardening Corrosion-Resistant and Maraging Steel parts (Tepelné zpracování precipitačně vytvrditelných korozivzdorných a vysokopevnostních ocelových dílců), AMS2750E Pyrometry (Pyrometrie) a AMS2769B Heat Treatment of Parts in a Vacuum (Tepelné zpracování dílců ve vakuu).

Požadované testy:

- mapování stejnoměrnosti teploty v peci (TUS),
- zkouška systémové přesnosti (SAT),
- test těsnosti pece,
- test řídicího regulátoru.

### 5.1 Test homogeneity teplotního pole (TUS)

Mapování stejnoměrnosti teploty, zkráceně TUS (Temperature Uniformity Survey), se provádí dle normy AMS2750E. Měření se provádí při maximální a minimální teplotě provozního rozsahu. Další teploty musí být přidávány tak, aby se zajistilo, že žádné dvě sousední mapované teploty nejsou od sebe vzdáleny více než 600 °F (335 °C) [23].

TUS může být prováděno s aktuální výrobní dávkou, simulovanou výrobní dávkou, s přípravky nebo při prázdné peci. Jakmile je metoda mapování pece stanovena během počátečního TUS, musí být následná měření prováděna stejnou metodou. Četnost měření je pro pec třídy 2 s nástroji měření typu B jeden měsíc (viz Tab. 9). Pokud v průběhu čtyř následujících měření nedojde k odchylce od požadované hodnoty, prodlužuje se interval na tři měsíce [23].

Počet senzorů pro měření TUS se určuje objemovou metodou využitelné pracovní zóny. Pro objem do 6,4 m<sup>3</sup> se používá 9 senzorů (viz Tab. 8) umístěných podle obr. 19 [23].

**Tab. 8** Počet senzorů pro měření TUS (výběr) [23].

Pracovní zóna méně než	0,085 m <sup>3</sup>	6,4 m <sup>3</sup>	8,5 m <sup>3</sup>	11 m <sup>3</sup>
Počet senzorů třída pece 1 a 2	5	9	14	16
Počet senzorů třída pece 3 až 6	5	9	12	13

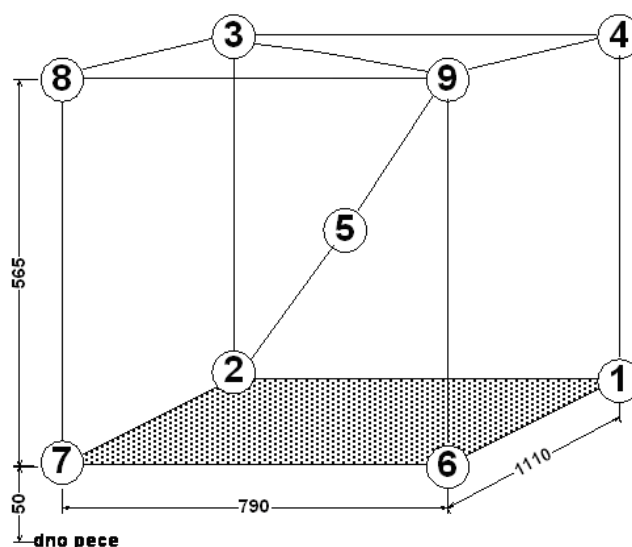
**Tab. 9** Četnost měření TUS dle normy SAE AMS2750E [23].

třída pece	stejnoseměnost teploty		minimální typ nástroje	počáteční frekvence TUS	počet úspěšných po sobě jdoucích TUS 1)	snížená četnost pravidelných TUS
	°F	°C				
1	±5	±3	D	měsíčně	8	co půl roku
			B, C	čtvrtletně	4	co půl roku
			A	čtvrtletně	2	co půl roku
2	±10	±6	D	měsíčně	8	co půl roku
			B, C	čtvrtletně	4	co půl roku
			A	čtvrtletně	2	co půl roku
3	±15	±8	D	čtvrtletně	4	co půl roku
			B, C	co půl roku	3	ročně
			A	co půl roku	2	ročně
4	±20	±10	D	čtvrtletně	4	co půl roku
			B, C	co půl roku	3	ročně
			A	co půl roku	2	ročně
5	±25	±14	D	čtvrtletně	4	co půl roku
			B, C	co půl roku	3	ročně
			A	co půl roku	2	ročně
6	±50	±28	E	ročně	neplatné	ročně

1) počet úspěšných po sobě jdoucích zkoušek požadovaných před přechodem na omezenou četnost TUS

Sběr dat se provádí pomocí přístrojů kalibrovaných nezávislou zkouškou splňující požadavky kalibrace  $\pm 0,6$  °C, a nezávislých senzorů TUS, které splňují toleranci kalibrace  $\pm 2,2$  °C. Mapování se považuje za přijatelné [23]:

- údaje senzorů TUS a údaje kontrolního senzoru nepřekročují kladné teplotní tolerance po celou dobu měření,
- všechny údaje senzorů TUS a kontrolních senzorů jsou v rámci požadavků na teplotní toleranci (pro pec třídy 2 platí toleranční pole  $\pm 6$  °C) během celé doby měření,
- měření TUS probíhá minimálně po dobu 30 minut během ustálené teploty.



**Obr. 19** Rozmístění senzorů pro měření TUS [26].

Zpráva z mapování teplotní stejnoměrnosti musí obsahovat [23]:

- identifikační název nebo číslo pece,
- mapované teploty,
- senzory TUS a jejich umístění (obrázek, graf, fotografie),
- korekční faktory, popř. opravené nebo neopravené údaje všech senzorů TUS,
- označení a podpis společnosti provádějící měření,
- jméno technika provádějícího měření,
- datum a čas zahájení měření,
- datum a čas ukončení měření,
- identifikační číslo měřicího přístroje,
- výsledek měření,
- dokumentace o případném selhání měření,
- čas a teplotu senzorů TUS,
- shrnutí konečných údajů pro každou teplotu,
- schválení měření oddělení jakosti (metrologie).

K dispozici by měly být [23]:

- zpráva o kalibraci senzorů TUS,
- zpráva o kalibraci kontrolního senzoru,
- kalibrace měřicího přístroje,
- schéma umístění senzorů TUS v trojrozměrném prostoru (obr. 19).

### 5.1.1 Testování TUS

Úvodní test TUS pro pec BMI B55R byl proveden externí firmou na prázdné peci při teplotách 150 °C, 290 °C, 430 °C, 570 °C, 710 °C (podmínka max. 335 °C mezi dvěma sousedícími teplotami dodržena).

Pro záznam byl použit přístroj Almemo 2890-9 s kalibračním protokolem R33/14. Jedná se o kombinovaný univerzální ruční měřicí přístroj s 9 univerzálními vstupy, 2 výstupy (RS232, analog, Centronics ad.) a vnitřní paměť pro uložení až 100 000 naměřených hodnot v předvoleném časovém měřicím cyklu. K přístroji lze pomocí speciálních programovatelných ALMEMO konektorů připojit jakékoli čidlo pro měření fyzikálních, elektrických a chemických veličin. Ukázka záznamu teplot je v Příl. 3 a 4.

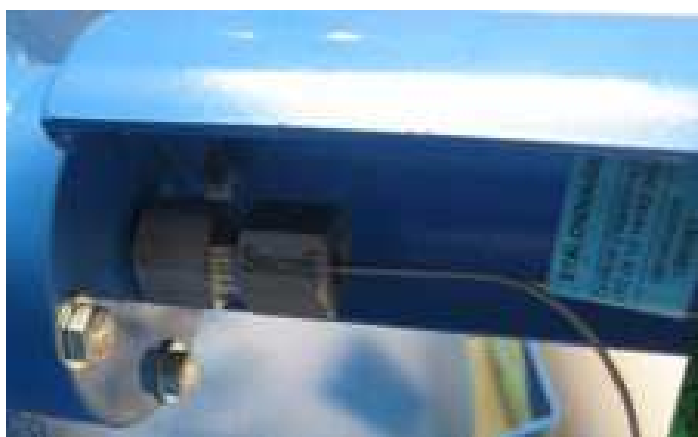
**Tab. 10** Korekční faktory senzorů pro měření TUS [26].

	150 °C	290 °C	430 °C	570 °C	710 °C
14N41	0,1	0,1	0,1	-0,1	-0,1
14N42	0,1	0,2	0,3	0	0,5
14N43	0,1	0,2	0,3	0	0,1
14N44	0,2	0,3	0,4	0,2	0,6
14N45	0,2	0,2	0	-0,5	-0,2
14N46	0,2	0,3	0,3	-0,1	0,6
14N47	0,2	0,2	0,2	0	0,9
14N48	0,2	0,2	-0,2	0,2	-0,1
14N49	0,1	0	0	0,4	0,8

Použité senzory, ozn. 14N41 až 14N49, jsou typu N, průměr 1,5 mm, délka 4 m, korekční faktory senzorů jsou uvedeny v Tab. 10 a vychází z kalibračních protokolů pro jednotlivé senzory (ukázka viz Příloha 2). Místo pro vložení senzorů a umístění senzorů v peci je na obr. 20 a 21.



**Obr. 20** Umístění senzorů v peci.



**Obr. 21** Místo pro připojení senzorů.

Na základě naměřených teplotních hodnot senzorů a po započtení korekcí (Tab. 11) lze konstatovat, že homogenita teplotního pole pece BMI B55R odpovídá standardům pro pec třídy 2 dle AMS2750E (tolerance  $\pm 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

**Tab. 11** Naměřené hodnoty TUS (souhrn) [26].

	150 °C		290 °C		430 °C		570 °C		710 °C	
<b>max.</b>	153,7	3,7	294,3	4,3	434,5	4,5	574,6	4,6	713,6	3,6
<b>min.</b>	148,7	-1,3	289,9	-0,1	430,9	0,9	572,5	2,5	710,7	0,7
<b>průměr</b>	150,5	0,5	290,9	0,9	432,1	2,1	573,4	3,4	712,0	2,0
max.	všechna data									
min.	stabilizovaný stav									
median	stabilizovaný stav									

## 5.2 Zkouška systémové přesnosti (SAT)

Tato zkouška přesnosti měření a záznamu teploty, zkráceně SAT (System Accuracy Test), je určena pro řídicí a záznamové senzory (termočlánky) a další doplňující nástroje měření, které jsou definovány pro typy A, B nebo C. Zkouška není požadována pro senzory, které hlídají překročení teploty, nebo které jsou omezeny na jedno použití (jeden cyklus v peci) [23].

**Tab. 12** Interval měření SAT [23].

třída pece	stejnomořnost teploty		minimální typ nástroje	běžný interval SAT	maximální přípustný interval SAT	maximální rozdíl SAT <sup>2</sup>		
	°F	°C				°F	°C	% údajů
1	±5	±3	D	týdně	týdně	±2	±1.1	0.2
			B,G	týdně	co dva týdny			
			A	co dva týdny	měsíčně			
2	±10	±6	D	týdně	týdně	±3	±1.7	0.3
			B,G	co dva týdny	měsíčně			
			A	měsíčně	čtvrtletně			
3	±15	±8	D	co dva týdny	měsíčně	±4	±2.2	0.4
			B,G	měsíčně	čtvrtletně			
			A	čtvrtletně	co půl roku			
4	±20	±10	D	co dva týdny	měsíčně	±4	±2.2	0.4
			B,G	měsíčně	čtvrtletně			
			A	čtvrtletně	co půl roku			
5	±25	±14	D	co dva týdny	měsíčně	±5	±2.8	0.5
			B,G	měsíčně	čtvrtletně			
			A	čtvrtletně	co půl roku			
6	±50	±28	E	co půl roku	co půl roku	±10	±5.6	1.0

Nová zkouška SAT se provádí po každé údržbě, mající vliv na přesnost snímání teploty. Např. výměna termočlánku, kalibrace řídicího regulátoru apod. Četnost měření je definována normou AMS2750E – výběr viz Tab. 12 [23].

Postup zkoušky systémové přesnosti [23]:

- měření SAT probíhá při libovolné teplotě (doporučuje se teplota z nejčastěji používaného teplotního cyklu);
- hrot senzoru TUS musí být umístěn co nejbližší měřeného senzoru (termočlánku), vzdálenost mezi oběma hroty nesmí přesáhnout 76 mm;
- trvalé termočlánky využívající se pro SAT jsou typu N,R nebo S a pokud překračují teplotu 538 °C, musí být nespotební;
- typ trvalého senzoru musí být odlišný od měřeného senzoru a podléhá výměně a požadavku na opětovnou kalibraci dle normy AMS2750E;
- do odchylky systémové přesnosti musí být zahrnut rozdíl mezi neopraveným údajem testovaného senzoru a opraveným údajem (zahrnutý korekční faktory zkušební senzoru a zkušební nástroje), platné korekční faktory se používají algebraicky;
- v případě překročení povoleného rozdílu dle daného typu pece (viz Tab. 12) je nutné toto selhání analyzovat a provést nápravná opatření, následně se provede opakované měření.

Zkouška systémové přesnosti se provádí záznamovým přístrojem, který splňuje kalibrační přesnost  $\pm 0,6$  °C a záznamové senzory splňují kalibrační přesnost  $\pm 1,1$  °C [23].

Zpráva z testu systémové přesnosti musí obsahovat [23]:

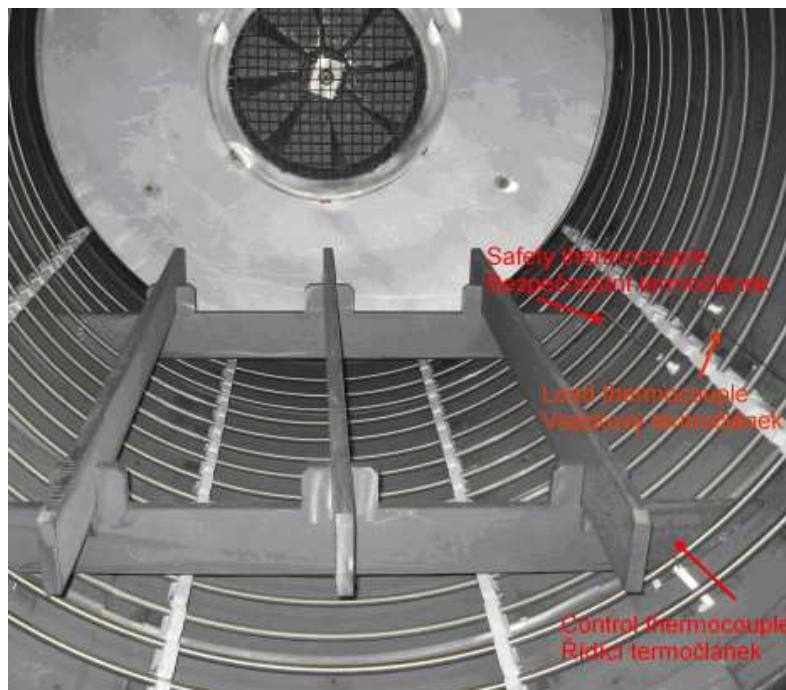
- označení testovaného senzoru,
- označení zkušební senzoru,
- označení měřicího přístroje,
- datum a čas měření,
- naměřené hodnoty testovaného senzoru,



- naměřené údaje zkušebního senzoru,
- korekční faktory zkušebního senzoru a měřicího přístroje,
- opravené údaje měřicího přístroje,
- vypočítaný rozdíl systémové přesnosti,
- schválení nebo zamítnutí testu,
- označení technika, který provedl testování,
- označení firmy provádějící testování (pokud není prováděno vlastní firmou),
- podpis zástupce firmy provádějící kalibrace (pokud není prováděno vlastní firmou),
- schválení oddělením jakosti (metrologie).

### 5.2.1 Testování SAT

Zkouška systémové přesnosti byla provedena externí firmou na prázdné peci. Podle požadavků normy AMS2750E se měření týká řídicího a vsázkového termočlánku (umístění v peci je na obr. 22).



**Obr. 22** Umístění vsázkového a řídicího termočlánku v peci.

Pro měření byly vybrány teploty 310 °C a 550 °C. Záznam naměřených hodnot byl proveden přístrojem Almemo 2890-9, ozn. H12030078 (obr. 23). Na základě předloženého kalibračního listu je odchylka pro tento přístroj 0 °C. Jako zkušební senzor byl použit termočlánek typu N, délka 500 mm, průměr 3 mm, označení 14N051. Kalibrační list pro senzor 14N051 byl doložen a korekční faktor pro teplotu 310 °C činil -0,3 °C, pro teplotu 550 °C byl naměřen -0,1 °C. Všechny korekční faktory byly použity pro výpočet systémové přesnosti SAT (viz Tab. 13) [27]. Záznam průběhu teplotního procesu znázorňuje obr. 24.

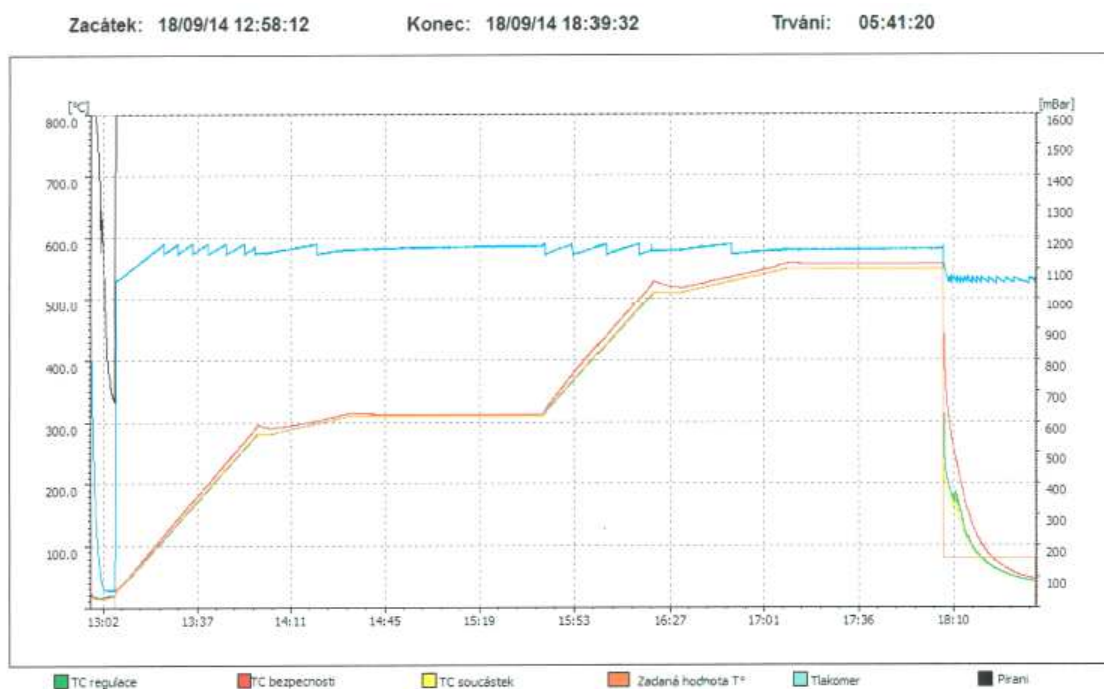


**Obr. 23** Datalogger ALMEMO 2890-9 [25].

Výsledek testu SAT ukazuje Tab. 12 a odpovídá toleranci  $\pm 1,7$  °C nebo 0,3 % měřeného údaje požadované pro pece třídy 2 dle AMS 2750E s nástroji typu B. Ukázka protokolu z měření je v Příloze 5.

**Tab. 13** Výsledek měření SAT pro teploty 310 °C a 550 °C [27].

Termočlánek	Měřená data (A)	Záznam zkušebního přístroje (D)	Korekční faktor zkušebního senzoru (E)	Korekční faktor zkušebního přístroje (F)	Skutečná teplota (G) = (D) + (E) + (F)	SAT (A) - (G)
Řídící	310,0 °C	310,4 °C	- 0,3 °C	0 °C	310,1 °C	- 0,1 °C
Vsázkový	308,7 °C	310,4 °C	- 0,3 °C	0 °C	310,1 °C	- 1,4 °C
Řídící	550,0 °C	550,0 °C	- 0,1 °C	0 °C	549,9 °C	+ 0,1 °C
Vsázkový	548,4 °C	550,0 °C	- 0,1 °C	0 °C	549,9 °C	- 1,5 °C



Obr. 24 Záznam průběhu měření SAT.

### 5.3 Test řídicího regulátoru

Na správné provedení požadovaného tepelného zpracování v teplotních tolerancích má nezanedbatelný vliv funkce řídicího regulátoru. Jeho schopnost pracovat v požadovaných teplotních cyklech je ověřována ve čtvrtletních intervalech podle požadavku AMS2750E pro řídicí a záznamové nástroje.

Ověřování schopnosti měření spočívá v připojení kalibračního přístroje na vstupy kontrolovaného regulátoru a porovnání zaznamenaných hodnot s údaji na certifikovaném kalibračním přístroji. Do výpočtu je nutné zahrnout i nejistotu měření pro normální rozdělení dat dle TPM 0051-93 a EA4/02.

#### 5.3.1 Testování regulátoru

Testování byl podroben řídicí regulátor Eurotherm 3508, označení FC1141000743 (obr. 25), který slouží jako řídicí a záznamový regulátor se vstupy pro řídicí a vsázkový termočlánek pece BMI B55R.



**Obr. 25** Eurotherm 3508.

Jako kalibrační přístroj byl použit standardní kalibrátor AOIP Calys 150, označení WEM41010-000 2511UV150153A, s kalibračním protokolem vystaveným ČMI č. 1031-KL-10075-14. Jedná se o multifunkční kalibrační přístroj určený ke kalibraci a údržbě termočlánků a měřících čidel a k měření a simulaci fyzikálních a elektrických veličin (obr. 26). Připojení provedeno na vstupy pro termočlánky typu N.



**Obr. 26** Multifunkční kalibrátor Calys 150 [27].

Výsledky měření (Tab. 14) odpovídají požadavkům na řídicí regulátor pro pec třídy 2 s instrumenty typu B. Uvedená rozšířená nejistota měření ( $u_c$ ) je stanovena jako standardní nejistota měření vynásobená koeficientem rozšíření  $k = 2$ , což pro normální

rozdělení dat znamená 95 % pravděpodobnost, že měřená data se nachází v uvedeném intervalu. Standardní nejistota byla stanovena v souladu s TPM 0051-93 a EA4/02.

**Tab. 14** Výsledky měření.

Hodnoty regulátoru (°C)	VSTUP 1 Řídící čidlo s uvedenou nejistotou měření (°C)	Vstup 1 - rozdíl	VSTUP 2 Vsázkové čidlo s uvedenou nejistotou měření (°C)	Vstup 2 - rozdíl
100	99,9 ± 1,2	-0,1	99,7 ± 1,2	-0,3
200	199,9 ± 1,2	-0,1	199,8 ± 1,2	-0,2
300	299,9 ± 1,2	-0,1	299,8 ± 1,2	-0,2
400	400,0 ± 1,2	0	399,9 ± 1,2	-0,1
500	500,0 ± 1,2	0	500,0 ± 1,2	0
600	600,0 ± 1,2	0	600,0 ± 1,2	0
700	700,0 ± 1,2	0	700,0 ± 1,2	0
800	800,0 ± 1,5	0	800,0 ± 1,5	0

## 5.4 Ověřování těsnosti pece

Těsnost pece pro precipitační vytvrzování je důležitou podmínkou, aby nedocházelo k oxidaci a zokoujení zpracovávaných dílců. Vzhledem k tomu, že se jedná o evakuovatelnou pec, řídí se podmínky ověřování normou SAE AMS2769B.

Měření (tzv. Leak Rate Test) pro hodnoty 1 mikron až 10<sup>3</sup> mikronů (1 torr) se provádí termočlánky nebo Pirani měrkou. Přípustné hodnoty pro některé materiály udává Tab. 15 [24].

**Tab. 15** Maximální netěsnost pro TZ materiálů [24].

<b>Materiál</b>	<b>Těsnost [mikronů/hod.]</b>
Uhlíková ocel	50
Korozivzdorné oceli:	
feritické	50
martenzitické	50
austenitické	50
precipitačně vytvrditelné	50
Titan a slitiny	10

Tlak vakuových a evakuovatelných pecí se udává v militorrech (mm Hg sloupce), nebo v milibarech. Vzhledem k jedné standardní atmosféře můžeme použít následující přepočty:

$$\begin{aligned}
 1 \text{ micron} &= 0,001 \text{ mm Hg sloupce} \\
 &= 1 \times 10^{-3} \text{ torru}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 1 \text{ atm.} &= 760 \text{ mm Hg sloupce} \\
 &= 1\,000 \text{ mbar}
 \end{aligned}$$

$$0,050 \text{ torr} = 0,0665 \text{ mbar}$$

Měření se provádí v týdenním intervalu při teplotě pece nižší než 80 °C [24].

#### 5.4.1 Leak Rate Test (LRT)

Postup manuálního měření:

- pec odčerpat na hodnotu minimálně 6,7 E-02 mbar,

- zaznamenat hodnotu tlaku na Pirani měrce (hodnota  $p_1$ ),
- po hodině znovu odečíst hodnotu (hodnota  $p_2$ ),
- vyhodnotit míru netěsnosti podle vzorce  $\frac{p_2-p_1}{t}$  [mbar · hod<sup>-1</sup>]
- hodnota  $\leq 0.067$  mbar · hod<sup>-1</sup> – hodnota těsnosti je v pořádku,
- hodnota  $> 0.067$  mbar · hod<sup>-1</sup> – hodnota těsnosti neodpovídá standardu.

Měření:

- pec odsáta na hodnotu 0,0646 mbar =  $p_1$
- hodnota po jedné hodině 0,0739 mbar =  $p_2$

Výpočet:

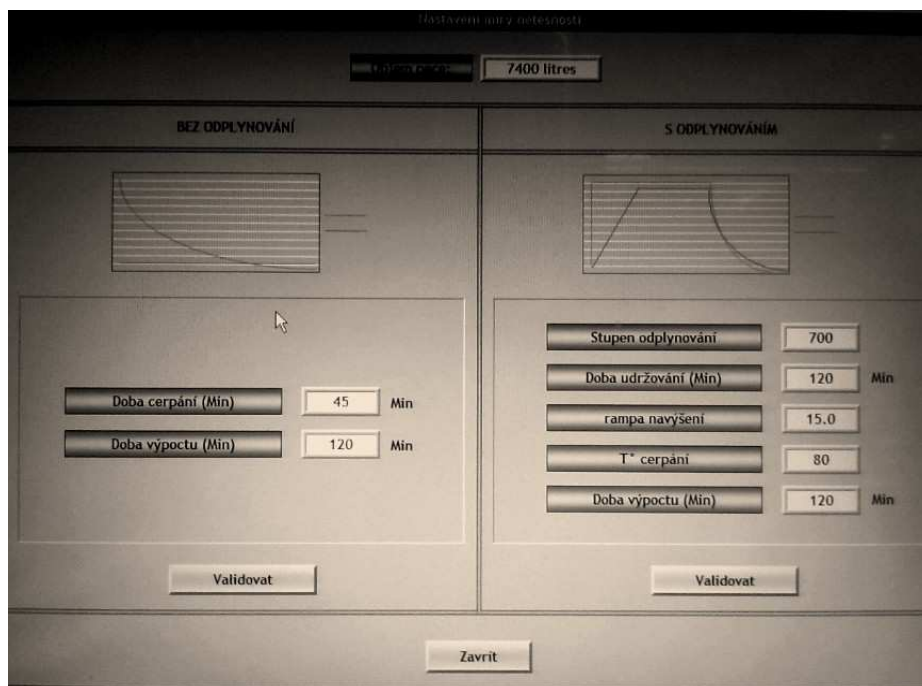
$$\frac{p_2-p_1}{t} = \frac{0,0739 - 0,0646}{1} = 0,0093 \text{ [mbar} \cdot \text{hod}^{-1}] \quad (5.1)$$

$$0,0093 < 0,067 \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Postup automatického měření:

- zadat program 1001 - bez odplynění, nebo program 1002 - s odplyněním (obr. 27)
- odečíst hodnotu na displeji,
- provést vyhodnocení.





**Obr. 27** Programy pro automatické měření těsnosti.

V případě překročení hraniční hodnoty je nutné vyčistit dosedací plochy s těsněním a provést vypálení topné komory při teplotě 700 °C (prog. 1002). Pokud stále dochází k větším únikům, musí být netěsnost dohledána (např. zkouškou héliem).

## 5.5 Shrnutí schopností pece

Testy TUS, SAT a řídicího regulátoru potvrdily schopnost pece splnit požadavky AMS2759/3 a AMS2750E na teplotní tolerance, rozložení teplot v topné komoře a přesnost záznamů pro precipitační vytvrzování leteckých materiálů. Tyto testy je nutné provádět v požadovaných intervalech a věnovat velkou pozornost jejich vyhodnocování. Kalibrace termočlánků, regulátoru Eurotherm 3508 a testy TUS a SAT byly zpracovány do Plánů kalibrace řízených oddělením Metrologie a jsou součástí Systému managementu kvality firmy.

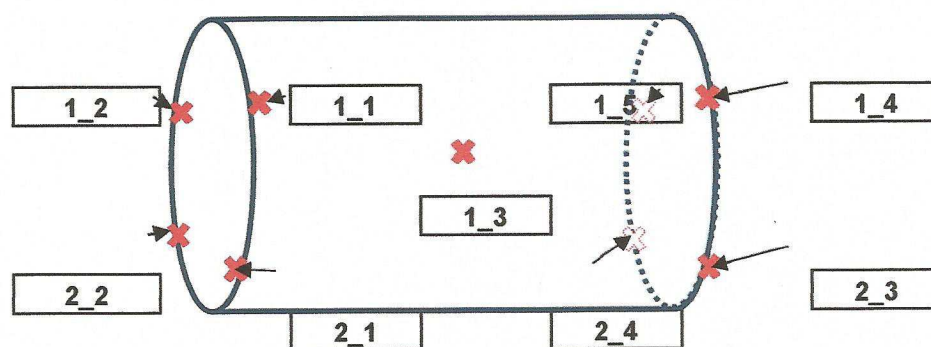
Rovněž testování těsnosti pece podle AMS2769B splňuje kritéria na tepelné zpracování precipitačně vytvrditelných ocelí. Pravidelné týdenní testování může predikovat narůstající znečištění topné komory, popřípadě poškození těsnících prvků a zabránit oxiaci a následnému nevhodnému zabarvení opracovaných dílců.

## 6 OVĚŘOVÁNÍ PROCESU

K ověření schopnosti řízení tepelného zpracování byl vybrán proces precipitačního vytvrzování materiálů 15-5PH (AMS5659, UNS 15500) na stav H1025, PH13-8Mo (AMS5629, UNS 13800) na stav H1000 a žhání (Stress Relieving) výkovku titanové slitiny 10V-2Fe-3Al.

### 6.1 Požadavky na testování vzorků

Testování precipitačního vytvrzení bude provedeno na vzorcích (obr. 29) dle interního předpisu zákazníka EP225 a norem SAE AMS2759/3 a AMS2759/11. Umístění vzorků v pecním prostoru dle obr. 28.



Obr. 28 Umístění vzorků.

Požadavky na test tvrdosti:

- počet vzorků: 9 + 9 kusů,
- rozměry:  $\varnothing 4 \times 15$  mm,
- měření tvrdosti dle ASTM E18 – Standardní testovací metody pro měření tvrdosti Rockwellovou metodou,
- parametry: tabulka 5 normy SAE AMS2759/3.

Požadavek na tahovou zkoušku:

- počet vzorků: 9 + 9 kusů,
- rozměry:  $\varnothing 12 \times 83$  mm,
- zkouška dle ASTM E8 – Testovací metody pro tahovou zkoušku,
- parametry: dle materiálových norem SAE AMS5659 a AMS5629.

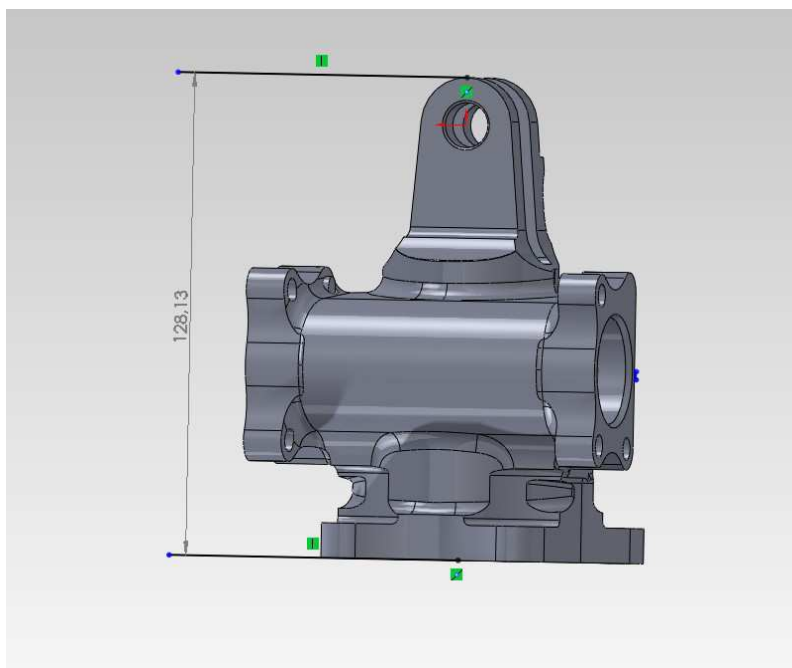
Požadavek na zjištění oduhličení a oxidaci povrchu:

- počet vzorků: 1 + 1 kusů,
- rozměry: dle normy SAE ARP1820B,
- vyhodnocení: dle normy SAE ARP1820B,
- parametry: hloubka intergranulární oxidace  $\leq 0,012$  mm,  
oduhličení v délce max. 0,076 mm [30].



**Obr. 29** Ukázka vzorků.

Žíhání titanové slitiny 10V-2Fe-3Al bude provedeno dle parametrů a požadavků normy SAE AMS2801B – Heat Treatment of Titanium Alloy Parts (Tepelné zpracování dílů z titanových slitin.)



**Obr. 30** Vzorek dílce z titanové slitiny.

Požadavky na test žíhání:

- vzorek: 1 ks produkčního dílu (obr. 30),
- vyhodnocení: dle SAE AMS2801B – Stress Relieving (žíhání na snížení pnutí),
- parametry: těsnost pece (LRT) max.  $0,016 \text{ mbar} \cdot \text{hod}^{-1}$ ,  
teplota min.  $28 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $50 \text{ }^{\circ}\text{F}$ ) pod teplotou vytvrzení,  
dodržení teplotních parametrů v intervalu  $\pm 14 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  
obrobené plochy jednotný povrch bez nežádoucího zabarvení (modré až tmavomodré skvrny).

## 6.2 Tepelné zpracování vzorků

Použité parametry tepelného zpracování pro materiál 15-5PH na stav H1025 se stanovují dle normy SAE AMS5659 a AMS2759/3 a jsou zobrazeny v Tab. 16.

**Tab. 16** Precipitační vytvrzování na stav H1025 [21].

15-5PH	H1025 požadováno	Nastaveno
teplota	$552 \pm 6 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$552 \text{ }^{\circ}\text{C}$
výdrž na teplotě	$4 + 0,5 \text{ hod.}$	$4,25 \text{ hod.}$

Použité parametry tepelného zpracování pro materiál PH13-8Mo na stav H1000 se stanovují dle normy SAE AMS5659 a AMS2759/3 a jsou zobrazeny v Tab. 17.

**Tab. 17** Precipitační vytvrzování na stav H1000 [21].

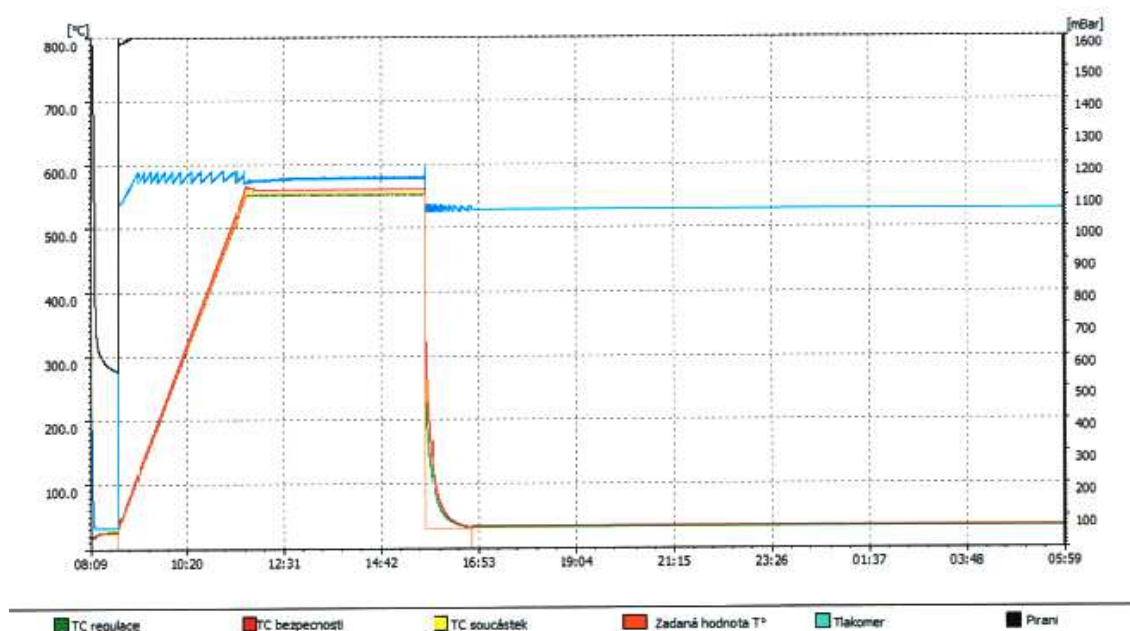
PH13-8Mo	H1000 požadováno	Nastaveno
teplota	$538 \pm 6 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$538 \text{ }^{\circ}\text{C}$
výdrž na teplotě	$4 + 0,5 \text{ hod.}$	$4,25 \text{ hod.}$

Použité parametry žíhání titanové slitiny 10V-2Fe-3Al se stanovují dle normy SAE AMS2801B a jsou zobrazeny v Tab. 18.

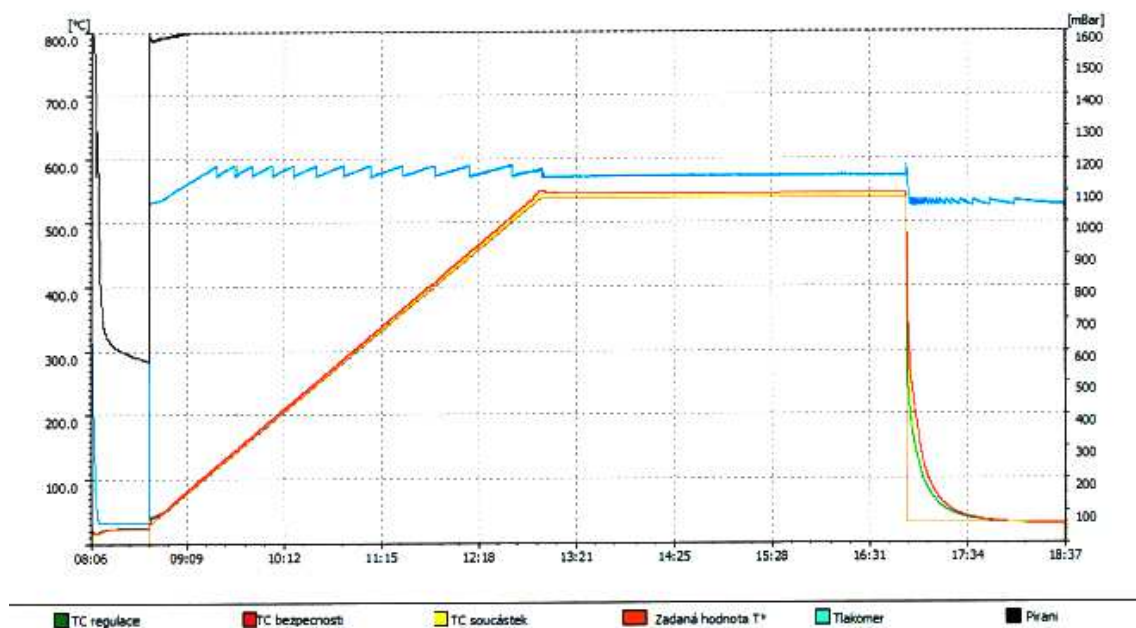
**Tab. 18** Žihání na snížení pnutí pro 10V-2Fe-3Al [29].

	Stress Relieving (žihání)	Nastaveno
teplota	482 ± 14 °C	482 °C
výdrž na teplotě	4 + 0,5 hod.	4,25 hod.

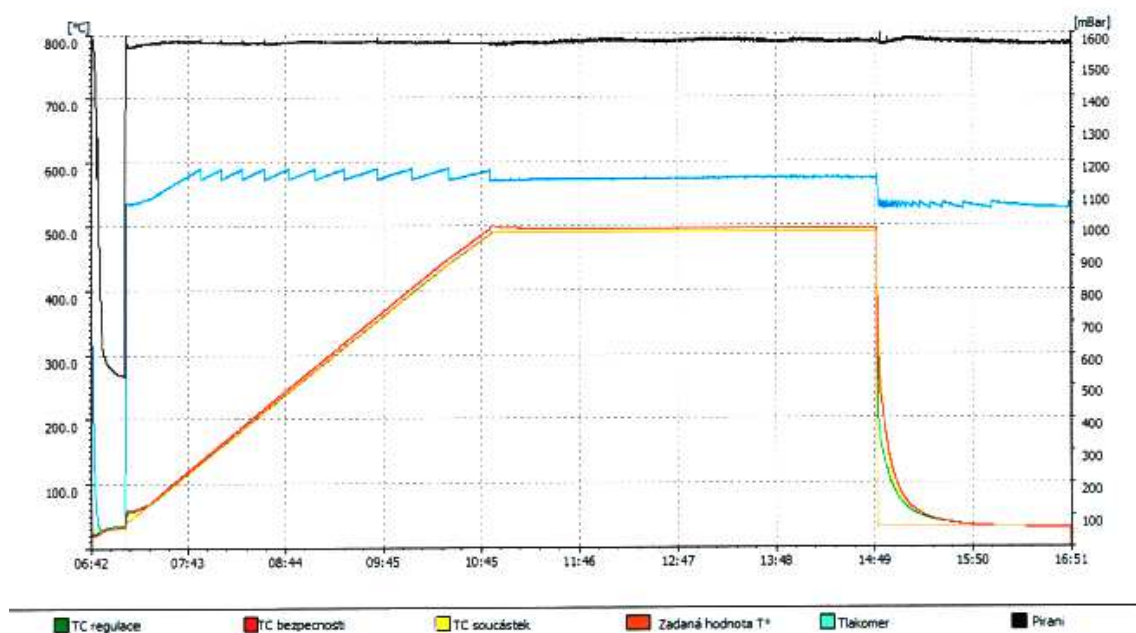
Uložení vzorků pro zkoušky jednotlivých procesů bylo provedeno podle obr. 28. Pro pec BMI B55R byly vytvořeny řídicí programy procesů. Ukázku programu zobrazuje Příloha 6. Záznamy jednotlivých procesů z pece BMI B55R jsou na obr. 31, 32, 33.

**Obr. 31** Průběh precipitačního vytvrzování mat. 15-5PH na stav H1025.





**Obr. 32** Průběh precipitačního vytvrzování mat. PH13-8Mo na stav H1000.



**Obr. 33** Průběh žíhání titanové slitiny 10V-2Fe-3Al.

### 6.3 Vyhodnocení vzorků

Pro slitiny 15-5PH a PH13-8Mo byl proveden chemický rozbor, který potvrdil shodnost vzorků se standardy pro uvedené materiály dle norem SAE AMS5659 a AMS5629 (Přílohy 16 a 17).

Na základě vyhodnocení záznamů z pecního zařízení (obr. 31, 32, 33) lze konstatovat, že veškeré požadované parametry (teplota, výdrž na teplotě, přetlak) byly dodrženy. Mechanické vlastnosti by tedy měly odpovídat standardům pro jednotlivé materiály.

### 6.3.1 Vzorky materiálu 15-5PH

Měření tvrdosti bylo provedeno na standardním tvrdoměru Rockwell 150, inv. č. 6149 (obr. 34). Kalibrační protokol je součástí Přílohy 7. Naměřené hodnoty jednotlivých vzorků zobrazuje Tab. 19.

**Tab. 19** Tvrdost pro mat. 15-5PH stav H1025 [21].

Požadováno 34–42 HRc			
A 1_1	38 HRc	A 2_1	38 HRc
A 1_2	38 HRc	A 2_2	38 HRc
A 1_3	38 HRc	A 2_3	39 HRc
A 1_4	38 HRc	A 2_4	38 HRc
A 1_5	38 HRc		



**Obr. 34** Tvrdoměr Rockwell 150.

Měření mechanických vlastností (pevnost v tahu, smluvní mez kluzu, kontrakce a tažnost) bylo provedeno v externí certifikované laboratoři. Požadované hodnoty a výsledek měření udávají Tab. 20 a Tab. 21. Ukázka protokolu je součástí Přílohy 8.



**Tab. 20** Mechanické vlastnosti pro mat. 15-5 PH stav H1025 [31].

Mechanické vlastnosti	Hodnoty
pevnost v tahu $R_m$ [MPa]	min. 1 069
smluvní mez kluzu $R_{p0.2}$ [MPa]	min. 1 000
tažnost A [%]	min. 12
kontrakce Z [%]	min. 45

**Tab. 21** Výsledky měření mechanických vlastností vzorků.

Tensile Test - ASTM E8/E8M-13a (METHOD B)								
	Dimensions [mm]	Area [mm <sup>2</sup> ]	GL [mm]	$R_{p0.2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	A%	Z%	Comments
001:Pre-machined Sample	5.650	25.072	22.55	1091	1134	18.0	68	A1_1
002:Pre-machined Sample	5.630	24.895	22.55	1097	1140	17.5	67	A1_2
003:Pre-machined Sample	5.640	24.983	22.55	1097	1140	18.0	67	A1_3
004:Pre-machined Sample	5.660	25.161	22.55	1112	1150	18.0	67	A1_4
005:Pre-machined Sample	5.640	24.983	22.55	N/A	1137	17.5	68	A1_5
006:Pre-machined Sample	5.650	25.072	22.55	1102	1143	17.0	66	A2_1
007:Pre-machined Sample	5.640	24.983	22.55	1109	1150	17.0	66	A2_2
008:Pre-machined Sample	5.660	25.161	22.55	1097	1138	19.5	66	A2_3
009:Pre-machined Sample	5.630	24.895	22.55	1090	1136	18.5	69	A2_4
Specification Minimum				1000	1069	12	45	
Specification Maximum								

Kontrola oduhličení povrchu a oxidace byla provedena externí laboratoří na jednom kusu vzorku. Pro určení oduhličení byla využita metoda měření mikrotvrdosti podle Knoopu se zatížením 3 kgf (29,4 N). Hloubka celkového oduhličení se stanoví jako vzdálenost od povrchu k místu požadované tvrdosti jádra.

Mezikrystalová oxidace (IGO) je povrchový jev, v jehož důsledku může materiál sousedící s oxidy změnit transformační vlastnosti. Například místo vzniku martenzitu může po kritickém ochlazení vzniknout nemartenzitická struktura (bainitická, perlitická) mající negativní vliv na mechanické vlastnosti materiálu (tvrdost, zbytkové napětí, únava v ohybu,...). Vyhodnocení se provádí pod mikroskopem při zvětšení 250x [30, 32].

Výsledky zjišťování povrchových vad jsou uvedeny v Tab. 22 a ukázka Protokolu o měření povrchových vad jako Příloha 9.

**Tab. 22** Výsledky oxidace a oduhličení.

Požadavek pro 15-5PH	Dosaženo
oduhličení max. 0,076 mm	0,000 mm
hloubka mezikrystalové oxidace max. 0,012 mm	0,000 mm

Závěr: Precipitačně vytvrzené vzorky materiálu 15-5PH z evakuovatelné pece BMI B55R **splňují** požadavky na stav H1025.

### 6.3.2 Vzorky materiálu PH13-8Mo

Požadované a naměřené hodnoty tvrdosti jednotlivých vzorků zobrazuje Tab. 23.

**Tab. 23** Tvrdost pro mat. PH13-8Mo stav H1000 [21].

Požadováno 43–48 HRc			
B 1_1	46 HRc	B 2_1	45 HRc
B 1_2	45 HRc	B 2_2	45 HRc
B 1_3	45 HRc	B 2_3	46 HRc
B 1_4	45 HRc	B 2_4	45 HRc
B 1_5	45 HRc		

Mechanické vlastnosti pro materiál PH13-8Mo stav H1000 udává Tab. 24. Výsledné hodnoty precipitačně vytvrzených vzorků na stav H1000 jsou v Tab. 25. Protokol o naměřených hodnotách mechanických vlastností precipitačně vytvrzených vzorků je přiložen jako Příloha 10.

**Tab. 24** Mechanické vlastnosti pro mat. PH13-8Mo stav H1000 [33].

Mechanické vlastnosti	Hodnoty
pevnost v tahu $R_m$ [MPa]	min. 1 413
smluvní mez kluzu $R_{p0.2}$ [MPa]	min. 1 310
tažnost A [%]	min. 10
kontrakce Z [%]	min. 50

**Tab. 25** Výsledky měření mechanických vlastností vzorků PH13-8Mo.

Tensile Test - ASTM E8/E8M-13a (METHOD B)								
	Dimensions [mm]	Area [mm <sup>2</sup> ]	GL [mm]	$R_{p0.2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	A <sub>8</sub>	Z <sub>8</sub>	Comments
001:Pre-machined Sample	5.650	25.072	22.55	1412	1465	14.5	66	B1_1
002:Pre-machined Sample	5.650	25.072	22.55	1414	1462	15.5	67	B1_2
003:Pre-machined Sample	5.650	25.072	22.55	1399	1458	14.0	67	B1_3
004:Pre-machined Sample	5.650	25.072	22.55	1402	1459	15.0	67	B1_4
005:Pre-machined Sample	5.610	24.718	22.55	1401	1457	15.0	67	B1_5
006:Pre-machined Sample	5.600	24.630	22.55	1436	1458	14.5	68	B2_1
007:Pre-machined Sample	5.590	24.542	22.55	1404	1456	14.5	68	B2_2
008:Pre-machined Sample	5.620	24.806	22.55	1426	1457	14.5	67	B2_3
009:Pre-machined Sample	5.630	24.895	22.55	1421	1454	15.0	67	B2_4
Specification Minimum				1310	1413	10	50	
Specification Maximum								

Výsledky zjišťování povrchových vad jsou uvedeny v Tab. 26 a ukázka Protokolu o měření povrchových vad jako Příloha 11.

**Tab. 26** Výsledky oxidace a oduhličení.

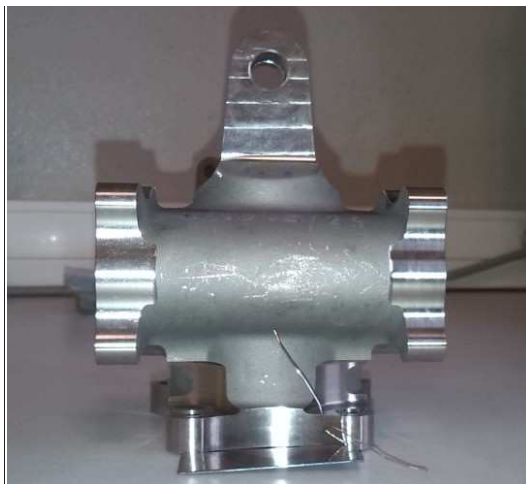
Požadavek pro PH13-8Mo	Dosaženo
oduhličení max. 0,076 mm	0,056 mm
hloubka mezikrystalové oxidace max. 0,012 mm	0,000 mm

Závěr: Precipitačně vytvrzené vzorky materiálu PH13-8Mo z evakuovatelné pece BMI B55R **splňují** požadavky na stav H1000.

### 6.3.3 Titanová slitina 10V-2Fe-3Al

Prověřování schopnosti pece u titanové slitiny je zaměřeno na žíhací proces (Stress Relieving). Dílce při dodržení parametrů pro žíhání na snížení vnitřního pnutí (28 °C pod teplotou stárnutí – aging) musí mít jednotný povrch bez nežádoucího zabarvení obrobených ploch signalizující nevhodné povrchové nečistoty, popř. oxidaci povrchu, teplotní odchylka by měla splňovat toleranci  $\pm 14$  °C [29].

Porovnání dílce před a po tepelném zpracování je na obrázcích 35 a 36.



**Obr. 35** Vzorek před žíháním.



**Obr. 36** Vzorek po žíhání.

Závěr: Žíhaný vzorek nevykazuje žádné nevhodné zabarvení, teplotní proces proběhl dle zadaných parametrů, a tedy **splňuje** požadavky dle normy SAE AMS 2801B.

## 7 OVĚŘOVACÍ SÉRIE

### 7.1 Precipitační vytvrzování

Pro testování precipitačního vytvrzení byl vybrán hydraulický válec A200405-3 (obr. 37).



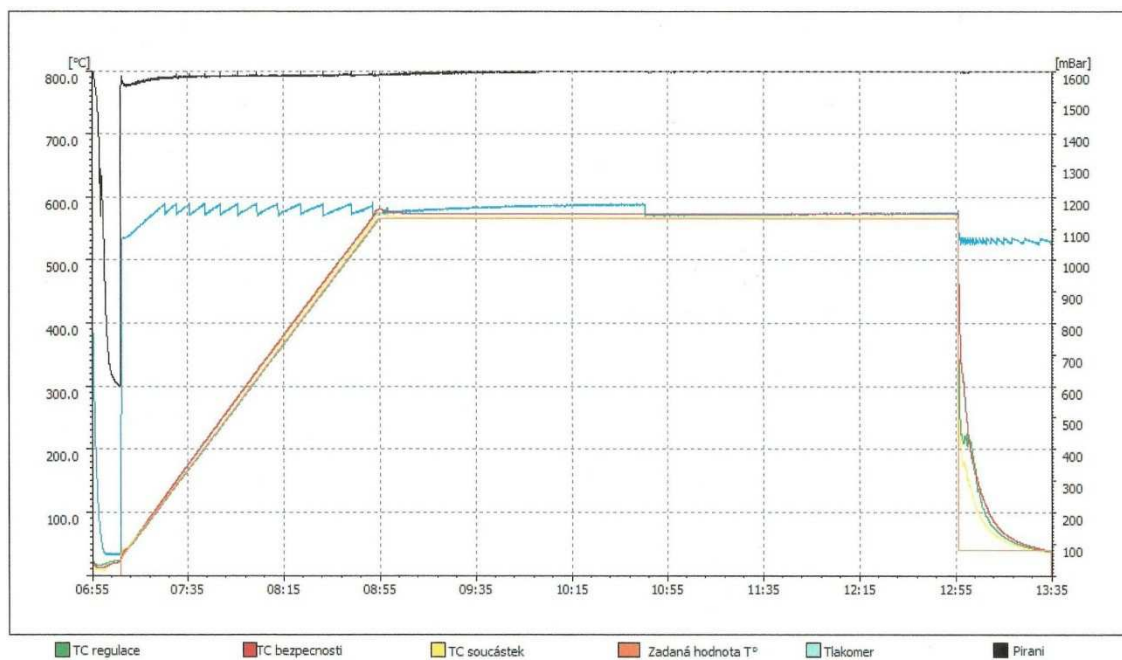
**Obr. 37** Válec A200405-3.

Parametry zvoleného válce z materiálu PH13-8Mo dle technologického postupu pro dílec A200405-3 (Příloha 13) zobrazuje Tab. 27:

**Tab. 27** Vybrané parametry pro TZ [33].

PH13-8Mo	Předpis	Nastaveno
stav	H1050	prog. 150
teplota	$566 \pm 6 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$566^{\circ}\text{C}$
výdrž na teplotě	4 + 0,5 hod.	4,25 hod.

Před tepelným zpracováním byl dílec v souladu s Návodkou pro tepelné zpracování HT 315/14 (Příloha 14) vyprán v UZ pračce, umístěn na základací rošt (obr. 37) a založen do pece. Záznam procesu - viz obr. 38. Dílec po precipitačním vytvrzení je na obr. 39.



**Obr. 38** Záznam procesu dílce A200405-3.

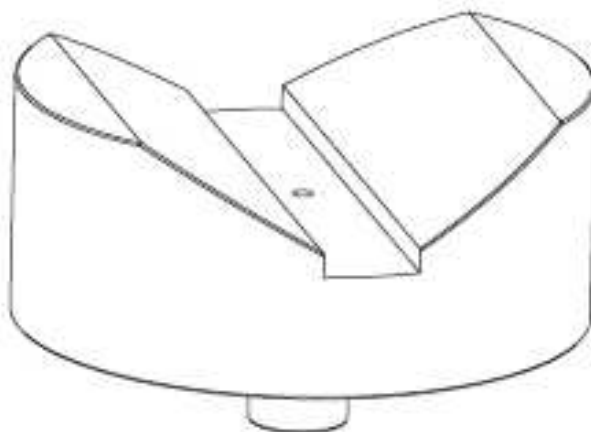


**Obr. 39** Válec A200405-3 po tepelném zpracování.

Standardní hodnoty pro precipitačně vytvrzený materiál PH13-8Mo stav 1050 [33]:

- tvrdost 40–46 HRC,
- pevnost v tahu  $R_m = \text{min. } 1\,207 \text{ MPa}$ ,
- smluvní mez kluzu  $R_{p0,2} = \text{min. } 1\,138 \text{ MPa}$ ,
- tažnost  $A = \text{min. } 12 \%$ ,
- kontrakce  $Z = \text{min. } 45 \%$ .

Měření tvrdosti bylo provedeno na standardním tvrdoměru Rockwell 150, inv. č. 6149. Naměřené hodnoty na válcové ploše - 44,7 HRC a 44,9 HRC - odpovídají požadavkům na tvrdost dle materiálové normy SAE AMS5629E pro precipitačně vytvrzený materiál na stav H1050.



**Obr. 40** Prizmo pro měření tvrdosti válce A200405-3.

Mechanické zkoušky byly provedeny v externí laboratoři na 2 kusech vzorků vyříznutých z testovaného dílce A200405-3. Zkoušky proběhly v souladu s normou ASTM E8/E8M. Výsledky tahové zkoušky (viz Tab. 28) **odpovídají** požadavkům dle materiálové normy SAE AMS5629E pro precipitačně vytvrzený materiál na stav H1050.



**Tab. 28** Výsledky tahové zkoušky.

	$R_m$	$R_{p0,2}$	A	Z
Vzorek č. 1	1 335 MPa	1 282 MPa	14,50%	53%
Vzorek č. 2	1 331 MPa	1 280 MPa	14,50%	55%
Minimální hodnoty	1 207 MPa	1 138 MPa	12%	45%

Veškeré naměřené hodnoty odpovídají standardním předpisům precipitačního vytvrzení materiálu PH13-8Mo na stav H1050 dle norem SAE AMS2759/3 a AMS5629E.

## 7.2 Žihání

Ověřovací série žihání dílce 893002 proběhla na 11 ks produkčních dílců dle parametrů normy SAE AMS2801B (viz Tab. 29 a 30). Před založením byla provedena zkouška těsnosti pece (LRT – Příloha 15) . Dílce byly vyprány v UZ pračce a naskládány do košů (obr. 41.).

**Tab. 29** Výsledek LRT před žiháním.

10V-2Fe-3Al	Předpis	Naměřeno
Test těsnosti pece	0,0160 mbar · hod <sup>-1</sup>	0,0140 mbar · hod <sup>-1</sup>

**Tab. 30** Parametry pro žihání.

10V-2Fe-3Al	Předpis	Nastaveno
stav	Stress Relief (žihání na snížení pnutí)	prog. 107
teplota	482 ± 14 °C	482 °C
výdrž na teplotě	4 + 0,5 hod.	4,25 hod.





**Obr. 41** Dílce před žíháním.



**Obr. 42** Dílce po žíhání.

Obrobené plochy ani těleso dílců po žíhání z teploty 482 °C a výdrži na teplotě 4,25 hodiny (viz obr. 42) nevykazují žádné nevhodné zabarvení. Teplotní i časová tolerance jsou v souladu s požadavky SAE AMS2801B, a tedy splňují požadavky na žíhané dílce.

## 8 SHRnutí VÝSLEDKŮ SCHVALOVACÍHO PROCESU

Schvalovací proces pecního zařízení proběhl v časovém horizontu cca 4 měsíců a je možné jej rozdělit do tří hlavních etap. První etapa se zabývala výběrem vhodného zařízení a jeho testováním podle leteckých norem SAE AMS2750E, AMS 2769B a AMS 2759/3E.

Druhá etapa zahrnovala tzv. vzorkování. Na základě požadavků zákazníka na tepelné procesy a dodávané materiály proběhlo ověřování procesů precipitačního vytvrzování na vzorcích materiálu 15-5PH (AMS5659, UNS15500) na stav H1025, materiálu PH13-8Mo (AMS5629, UNS13800) na stav H1000 a žíhání titanové slitiny 10V-2Fe-3Al dle SAE AMS2801B.

Třetí etapa se týkala již produkčních dílců. V případě precipitačního vytvrzování se jednalo o hydraulický válec A200405-3 z materiálu PH13-8Mo na stav H1050. Žíhání proběhlo u ověřovací série dílců 893002 z titanového materiálu 10V-2Fe-3Al.

Shrnutí jednotlivých etap obsahují níže uvedené přehledy:

**Tab. 31** Požadavky na pec pro precipitační vytvrzení.

Pec BMI B55R	Požadavek	Naměřeno
TUS	$\pm 6\text{ }^{\circ}\text{C}$	$+3,4\text{ }^{\circ}\text{C}$
SAT řídicího termočlánku	$\pm 1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ nebo 0,3 %	$\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$
SAT vsázkového termočlánku	$\pm 1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ nebo 0,3 %	$-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$
LRT	$67 \times 10^{-3}\text{ mbar/hod.}$	$9 \times 10^{-3}\text{ mbar/hod.}$

**Tab. 32** Porovnání výsledků vzorků mat. 15-5PH.

15-5PH	Stav H1025 požadavek	Naměřeno
teplota	552 ± 6 °C	552 °C
výdrž na teplotě	4 + 0,5 hod	4,25 hod.
tvrdost	34–42 HRc	38-39 HRc
pevnost v tahu $R_m$	min. 1 069 MPa	1 134–1 150 MPa
smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$	min. 1 000 MPa	1 090–1 112 MPa
tažnost A	min. 12 %	17–19,5 %
kontrakce Z	min. 45 %	66–69 %
oduhličení	max. 0,076 mm	0 mm
hloubka oxidace	max. 0,012 mm	0 mm

**Tab. 33** Porovnání výsledků vzorků mat. PH13-8Mo.

PH13-8Mo	Stav H1000 požadavek	Naměřeno
teplota	538 ± 6 °C	538 °C
výdrž na teplotě	4 + 0,5 hod	4,25 hod.
tvrdost	43–48 HRc	45–46 HRc
pevnost v tahu $R_m$	min. 1 413 MPa	1 454–1 465 MPa
smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$	min. 1 310 MPa	1 399–1 436 MPa
tažnost A	min. 10 %	14–15,5 %
kontrakce Z	min. 50 %	66–68 %
oduhličení	max. 0,076 mm	0,056 mm
hloubka oxidace	max. 0,012 mm	0 mm

**Tab. 34** Výsledek precipitačního vytvrzení válce A200405-3.

PH13-8Mo	Stav H1050 požadavek	Naměřeno
teplota	$566 \pm 6 \text{ }^{\circ}\text{C}$	566 $^{\circ}\text{C}$
výdrž na teplotě	4 + 0,5 hod	4,25 hod.
tvrdost	40–46 HRC	44,7 HRC, 44,9 HRC
pevnost v tahu $R_m$	min. 1 207 MPa	1 335 MPa, 1 331 MPa
smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$	min. 1 138 MPa	1 282 MPa, 1 280 MPa
tažnost A	min. 12 %	14,5 %
kontrakce Z	min. 45 %	53 % 55 %

Uvedené postupy pro ověřování schopnosti daného zařízení budou v budoucnu využity také při akreditaci programu Nadcap.

Nadcap (the National Aerospace and Defense Contractors Accreditation Program) je globální akreditační program pro letecké inženýrství, vojenský průmysl a související odvětví. Sdružuje především organizace z řad prvovýrobců a vychází z jejich přísných průmyslových norem, které respektují všichni účastníci (výrobci i dodavatelé). Není nutné provádět zákaznické a dodavatelské audity pro jednotlivé výrobce a dodavatele zvlášť – úspora nákladů [34].

## 9 ZÁVĚR

Výsledkem diplomové práce je popis principu schvalování vhodného pecního zařízení pro precipitační vytvrzování a žíhání vybraných leteckých materiálů.

Teoretická část práce je zaměřena na popis korozivzdorných materiálů obecně, jejich rozdělení a specifikace značení a jeho odlišnosti v Evropě a v Americe. Při popisu se vychází především ze zdrojů orientovaných na letecký průmysl.

Další část se zabývá vysokopevnostní martenzitickou ocelí, využívanou při konstrukci leteckých komponentů, a jejich tepelným zpracováním. Větší část statí je věnována především korozivzdorným precipitačně vytvrditelným materiálům, jejich využití v leteckém průmyslu, tepelnému zpracování, především procesu precipitačního vytvrzování a vhodným zařízením pro tepelné zpracování.

Praktická část popisuje průběh schvalovacího procesu zaměřeného na precipitační vytvrzování a žíhání. V první etapě byly ověřeny možnosti vybraného pecního zařízení splnit požadavky SAE AMS norem na homogenitu teplotního pole, systémovou přesnost řídicích a záznamových čidel a těsnost pece.

Po splnění požadavků kladených na pecní zařízení byla druhá etapa věnována vzorkování. V jejím průběhu bylo na vzorcích vybraných materiálů provedeno precipitační vytvrzení a byly porovnány dosažené mechanické vlastnosti se standardy pro vytvrzené materiály na určené stavy. Vyhodnocení mechanických vlastností i povrchových vad proběhlo v externí laboratoři certifikované dle požadavků Nadcap, určených pro letecký průmysl.

Žíhání na odstranění pnutí proběhlo na zmetkovém produkčním dílci z titanové slitiny 10V-2Fe-3Al. Hodnocení bylo zaměřeno především na dodržení parametrů tepelného zpracování (Stress Relieving – žíhání na snížení pnutí) podle AMS normy a vyloučení nevhodného zabarvení obrobených ploch.

Poslední etapa byla věnována ověřovací sérii produkčních dílců. Po jejich vyhodnocení a porovnání všech dosažených výsledků byl udělen zákaznický certifikát pro využívání uvedeného zařízení pro precipitační vytvrzování a žíhání dodávaných dílců (Příloha 18).

Udělením schválení však celý proces nekončí. Naopak, jedná se pouze o začátek celého systému kvality. Vzhledem k tomu, že jde o letecké komponenty, je velký důraz

kladen nejen na kontrolu finálních výrobků, ale především na prevenci zjišťování neshod již uvnitř celého procesu tepelného zpracování a předcházení jim. V tomto případě se jedná o pravidelná měření v určených intervalech dle AMS norem, a to TUS, SAT, regulátorů a těsnosti pece. Dalším důležitým bodem je pravidelná obnova vsázkových termočlánků a preventivní údržba dle stanovených intervalů.

Na základě tohoto schvalovacího procesu je možné nastavit jednotné postupy pro další zařízení určená k tepelnému zpracování segmentů z leteckého odvětví a v neposlední řadě připravit proces na certifikaci Nadcap.

## Seznam použitých zdrojů

1. BRENNER, Otakar. Korozivzdorné oceli jako konstrukční materiály. *MM Průmyslové spektrum*. 2003, č. 4, s. 84. Dostupné z:  
<http://www.mmspektrum.com/clanek/korozivzdorne-oceli-jako-konstrukcni-materialy.html>.
2. ČSN EN 1088-1. *Korozivzdorné oceli: Část 1: Přehled korozivzdorných ocelí*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
3. FREMUNT, Přemysl a Tomáš PODRÁBSKÝ. *Konstrukční oceli*. Brno: CERM, 1996, 261 s. ISBN 80-858-6795-8.
4. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II.*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-32.
5. Princip pasivace korozivzdorných ocelí. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2014 [cit. 2015-01-03]. Dostupné z:  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mecanisme\\_passivation\\_inox\\_cs.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mecanisme_passivation_inox_cs.svg)
6. MCGUIRE, Michael F. *Stainless steels for design engineers*. Materials Park, Ohio: ASM International, 2008, [v], 304 p. ISBN 978-087-1707-178.
7. ČÍHAL, Vladimír. *Korozivzdorné oceli a slitiny*. Vyd. 1. Praha: Academia, 1999, 437 s. ISBN 80-200-0671-0.
8. *Rozdělení a označení ocelí*. Plzeň, 2009. Dostupné z:  
[http://www.ateam.zcu.cz/znaceni\\_oceli.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/znaceni_oceli.pdf). Studijní opora. FST ZČU.
9. *Označování materiálů podle evropských norem*. Plzeň, 2009. Dostupné z:  
[http://www.ateam.zcu.cz/evropske\\_normy.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/evropske_normy.pdf). Studijní opora. FST ZČU.
10. BRINGAS, John E. *Handbook of comparative world steel standards*. 2nd ed. W. Conshohocken, PA: ASTM, 2002, ix, 660 p. ASTM data series publication, DS 67A. ISBN 08-031-3042-2.
11. MOURITZ, Adrian P. *Introduction to aerospace materials*. Cambridge, UK: Woodhead Pub., 2012, xiv, 621 p. ISBN 978-185-5739-468.
12. Properties of Maraging Steels. KEY TO METALS AG. *Total Materia* [online]. 2003 [cit. 2015-01-25]. Dostupné z:  
<http://keytometals.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=103>
13. MOHYLA, Miroslav. *Strojírenské materiály I*. 2. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2003. ISBN 80-248-0270-8.
14. ASTM E527-83. *Standard Practice for Numbering Metals and Alloys (UNS)*. West Conshohocken (USA): ASTM International, 2003. Dostupné z:  
<http://img03.mysteelcdn.com/wz/uploaded/steel/2009/09/09/File/tgpdf/ASTM%20E527-83.pdf>

15. FORET, Rudolf. *Fázové přeměny v tuhém stavu: Precipitační rozpad*. Brno, 2008.  
Dostupné z:  
[http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=10&ved=0CFAQFjAJ&url=http%3A%2F%2Fwww.primat.cz%2Fmoje-materialy%2Fdetail%2F24994%3FseoId%3Dvutbr-fme%26do%3Ddownload&ei=KXPcVJeYHJffapDCgsgB&usg=AFQjCNG-DQFR-KyRd8z\\_Ic5g84kfa\\_rzeg&bvm=bv.85761416,d.d2s](http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=10&ved=0CFAQFjAJ&url=http%3A%2F%2Fwww.primat.cz%2Fmoje-materialy%2Fdetail%2F24994%3FseoId%3Dvutbr-fme%26do%3Ddownload&ei=KXPcVJeYHJffapDCgsgB&usg=AFQjCNG-DQFR-KyRd8z_Ic5g84kfa_rzeg&bvm=bv.85761416,d.d2s). Studijní opora. FSI VUT.
16. MOHAMED, A.M.A. a F.H. SAMUEL. A Review on the Heat Treatment of Al-Si-Cu/Mg Casting Alloys. *Heat Treatment - Conventional and Novel Applications* [online]. InTech, 2012-09-26 [cit. 2015-02-14]. DOI: 10.5772/50282. Dostupné z:  
<http://www.intechopen.com/books/heat-treatment-conventional-and-novel-applications/a-review-on-the-heat-treatment-of-al-si-cu-mg-casting-alloys>
17. KHAIRA, Harish. *Precipitation Hardening* [online]. Bhopal, 2008 [cit. 2015-02-14].  
Dostupné z: <http://www.slideshare.net/RakeshSingh125/f-precipitation-hardening>. M.A. National Institute of Technology.
18. DAVIS, J. *Alloy digest sourcebook: stainless steels*. Materials Park, OH: ASM International, c2000, vii, 584 p. ISBN 08-717-0649-0.
19. Stainless Steel 15/5 PH. *Aalco-Metals Ltd.* [online]. 2014 [cit. 2015-02-14]. Dostupné z:  
[http://www.aalco.co.uk/datasheets/Aalco-Metals-Ltd\\_Stainless-Steel-155-PH\\_310.pdf.ashx](http://www.aalco.co.uk/datasheets/Aalco-Metals-Ltd_Stainless-Steel-155-PH_310.pdf.ashx)
20. *ASM Handbook Volume 4: Heat Treating*. Cleveland, Ohio: ASM International, 1991. ISBN 978-0-87170-379-8.
21. SAE AMS2759/3E. *Heat Treatment Precipitation-Hardening Corrosion-Resistant and Maraging Steel parts*. Warrendale: SAE International, 2008.
22. B5\_R. *Bmi-fours* [online]. 2014 [cit. 2015-03-13]. Dostupné z: [http://www.bmi-fours.com/B5\\_R,159](http://www.bmi-fours.com/B5_R,159)
23. SAE AMS2750E. *Pyrometry*. Warrendale: SAE International, 2012.
24. SAE AMS2769B. *Heat Treatment of Parts in a Vacuum*. Warrendale: SAE International, 2009.
25. ALMEMO 2890-9. *Ahlborn* [online]. 2015 [cit. 2015-03-31]. Dostupné z:  
<http://www.ahlborn.cz/pristroje/dataloggery-almemo/almemo-2890-9-datalogger-s-9-univerzalnimi-vstupy.html>
26. ECOSOND S.R.O. *Temperature Uniformity Survey Report*. Čerčany, 2014.
27. ECOSOND S.R.O. *System Accuracy Test*. Čerčany, 2014.
28. TECTRA, a.s. *Multifunkční kalibrátor Calys 150: Návod k použití*. 2010, 61 s.
29. SAE AMS2801B. *Heat Treatment of Titanium Alloy Parts*. Warrendale: SAE International, 2003.



30. SAE ARP1820B. *Chord Method of Evaluating Surface Microstructural Characteristics*. Warrendale: SAE International, 2007.
31. SAE AMS5659M. *Steel, Corrosion-Resistant, Bars, Wire, Forgings, Rings, and Extrusions 15Cr-4.5Ni-0.30Cb(Nb)-3.5Cu Consumable Remelted, Precipitation Hardenable*. Warrendale: SAE International, 2008.
32. HERRING, Dan. Intergranular Oxidation (IGO)/Intergranular Attack (IGA). *VAC AERO International Inc.* [online]. 2015 [cit. 2015-04-21]. Dostupné z: <http://vacaero.com/information-resources/the-heat-treat-doctor/1339-intergranular-oxidation-igo-intergranular-attack-iga.html>
33. SAE AMS5629E. *Steel, Corrosion-Resistant, Bars, Wire, Forgings, Rings, and Extrusions 13Cr-8.0Ni-2,2Mo-1.1Al Vacuum Induction Plus Consumable Electrode Melted Solution Heat Treatment, Precipitation Hardenable*. Warrendale: SAE International, 2006.
34. Nadcap: About Nadcap. *PERFORMANCE Review Institut* [online]. 2015 [cit. 2015-03-30]. Dostupné z: <http://p-r-i.org/nadcap/about-nadcap/>

**Seznam příloh**

Příloha 1	Tepelné zpracování vytvrzovacích ocelí
Příloha 2	Ukázka kalibračního listu senzoru pro měření TUS
Příloha 3	Grafický záznam teplot při měření TUS
Příloha 4	Data z měření TUS
Příloha 5	Ukázka protokolu z měření SAT
Příloha 6	Ukázka programu pro pec BMI B55R
Příloha 7	Kalibrační list tvrdoměru Rockwell 150
Příloha 8	Výsledky mechanických zkoušek vzorků mat. 15-5PH
Příloha 9	Protokol povrchových vad mat. 15-5PH
Příloha 10	Výsledky mechanických zkoušek vzorků mat. PH13-8Mo
Příloha 11	Protokol povrchových vad mat. PH13-8Mo
Příloha 12	Protokol na žíhání 0 899 002 – vzorek
Příloha 13	Technologický postup pro dílec A200405-3
Příloha 14	Návodka na tepelné zpracování pro dílec A200405-3
Příloha 15	Měření míry netěsnosti pece před žíháním
Příloha 16	Chemický rozbor mat. 15-5PH (AMS5659)
Příloha 17	Chemický rozbor mat. PH13-8Mo (AMS5629)
Příloha 18	Zákaznický certifikát

### *PODĚKOVÁNÍ*

Poděkování patří vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Petru Mohylovi, Ph.D. za ochotu, odborné rady a cenné připomínky, Kateřině Chvojsíkové a Michaele Vašíčkové za technickou pomoc a v neposlední řadě také rodině a přátelům za podporu.